REVISTA ILHA DIGITAL

A REVISTA ILHA DIGITAL é uma publicação semestral *on-line* do Departamento Acadêmico de Eletrônica, Campus Florianópolis, do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IF-SC).

Os artigos publicados são de total responsabilidade de seus autores. Todos os artigos podem ser apropriados para fins que não sejam comerciais, resguardada a citação da fonte.

Contribuições para publicação na próxima edição devem ser feitas *on-line* através da página da revista na Internet: http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

Conselho Editorial

Cláudia Regina Silveira
Joel Lacerda
Leandro Schwarz
Luiz Alberto de Azevedo
Marco Antônio Quirino Pessoa
Marco Valério Miorim Villaça
Muriel Bittencourt de Liz
Wilson Berckembrock Zapelini

Corpo de Revisores

André Luís Dalcastagnê
Charles Borges de Lima
Clóvis Antônio Petry
Everton Luiz Ferret dos Santos
Fernando Luiz Rosa Mussoi
Flábio Alberto Bardemaker Batista
Jony Laureano Silveira
Maurício Gariba Júnior
Paulo Ricardo Telles Rangel
Rafael Luiz Cancian
Carlos Gontarski Speranza
Cláudio Luís Ebert
Delmar Carvalho de Souza
Fernanda Isabel Marques Argoud
Fernando Santana Pacheco
Golberi de Salvador Ferreira
João Goulart Júnior
Luis Carlos Martinhago Schlichting
Mauro Tavares Peraça

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
Campus Florianópolis
Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN)
Avenida Mauro Ramos, 950 – Florianópolis/Santa Catarina
CEP: 88.020-300 – Telefone: (48) 3221-0565 e Fax: (48) 3224-1500
e-mail: ilhadigital@ifsc.edu.br
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

EDITORIAL

O lançamento desta segunda edição da revista eletrônica **Ilha Digital**, já com número de ISSN, vem para consolidar o que já antecipava a primeira edição, isto é, *promover e manter acesa a chama da efervescência acadêmica [...] que possibilite socializar conhecimentos e experiências*.

De fato, conseguir converter pesquisas e práticas de ensino em sólidos construtos textuais e, indo além, conceber e implementar uma mídia eletrônica que consiga difundir toda a sua produção para o meio acadêmico, é um feito que revela iniciativa, dinamicidade, ousadia e espírito inovador, características raramente encontradas neste país ainda carente de valores humanos relacionados ao cultivo da ética e do intelecto.

Ilha Digital ainda pode se orgulhar de conseguir empreender seu trabalho sem qualquer participação, envolvimento ou colaboração oficial dos gestores institucionais. Se, por um lado, isso demonstra a capacidade autossuficiente do Depto. Acadêmico de Eletrônica, por outro lado, demonstra a necessidade de articulação entre este Depto. e os respectivos representantes institucionais.

Esta segunda edição apresenta um conjunto de nove artigos que procuram manter sua qualidade e sua linha editorial em termos educacionais, científicos e tecnológicos.

O primeiro artigo, de Fernando S. Pacheco, intitulado “Sistemas de síntese de fala”, objetiva esclarecer o processo de transformação de um texto numa mensagem falada, onde também apresenta um panorama histórico dos sistemas desenvolvidos.

O segundo artigo, de Muriel Bittencourt de Liz e Luiz Alberto de Azevedo, objetiva esclarecer se os constructos teóricos epistemológicos CTS possibilitam a superação “behaviorista e funcionalista” dos cursos superiores de tecnologia (CTS).

O terceiro artigo, de Cleidir Salvato da Silva e de Muriel Bittencourt de Liz, foca no controle e medição de demanda de energia elétrica, no qual, um protótipo controlador de demanda com interface Ethernet foi concebido e desenvolvido para a devida mensuração.

O quarto artigo, de Alexandre Albaarello, Celso Luis de Souza, Diego de Moura e Ingrid Carolini Cezário, apresenta uma investigação das emissões conduzidas e radiadas de uma estação de solda com temperatura ajustável operando em várias situações de carga.

O quinto artigo, de Lucas de Mello Kindermann e Everton Luiz Ferret dos Santos, tem a domótica como recurso tecnológico, representada pelo sistema de acionamento automático de dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos microcontrolados.

O sexto artigo, de Renan Luís S. de Souza, Filipe Rogério C. da Silva e Nicksonei Fabra da Silva, demonstra o aproveitamento da energia solar na iluminação pública de Florianópolis.

O sétimo artigo, de Carlos Filipe Gonçalves dos Santos, refere-se ao uso de um *software* para simulação de filtro passa-baixa de quinta ordem com análise de sensibilidade.

O oitavo artigo, de Miguel Antônio Sovierzoski, descreve a operação de convolução, com diferentes representações de sinais e funções, bem como suas propriedades e o relacionamento com as transformadas de Laplace, de Fourier e de transformada Z.

O nono e último artigo apresenta um tutorial técnico do temporizador 555, explicando sua história, seu princípio de funcionamento, suas formas de utilização e alguns circuitos exemplos de aplicação.

Desejamos-lhe uma boa leitura e que aprecie os trabalhos aqui expostos, lembrando que você pode estabelecer contato via e-mail com os autores ou com os editores, a qualquer momento, para dirimir dúvidas, estabelecer alguma parceria acadêmica em suas futuras pesquisas ou para planejar futuras publicações nesta revista eletrônica.

Conselho Editorial

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

ARTIGO DE REVISÃO: SISTEMAS DE SÍNTESE DE FALA

Fernando Santana Pacheco[1]

Resumo: Este artigo apresenta uma revisão sobre sistemas de síntese de fala. Inicia com uma contextualização histórica, partindo dos sistemas mecânicos do século XVIII e progredindo até os atuais programas computacionais de geração de fala sintética. Os sistemas de síntese de fala dividem-se em duas categorias: resposta vocal e conversão texto-fala. Foca-se, neste artigo, nos sistemas de conversão de texto para fala (TTS, do inglês *text-to-speech*). Discutem-se aplicações atuais e futuras de tais sistemas. Por fim, apresenta-se a estrutura dos modernos sistemas TTS, dividida em análise linguística e processamento de sinais.

Palavras-chave: Processamento de sinais. Conversão texto-fala. Síntese de fala.

***Abstract**: This paper presents a review about speech synthesis systems. We begin with an historic overview, from 18th-century mechanical systems through recent speech synthesis softwares. There are two categories of speech synthesis systems: vocal response and text-to-speech (TTS). In this paper, we focus on TTS systems. We discuss current and future applications in this area. Finally, we present the structure of modern TTS systems, formed by linguistic analysis and signal processing.*

***Keywords**: Speech processing. Speech synthesis. Text-to-speech systems.*

[1] Professor do DAELN do IF-SC <fspacheco@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

O desejo humano de dar fala a um objeto ou máquina acompanha a civilização há muito tempo. Os primeiros sistemas de produção de fala artificial surgiram no século XVIII. Eram mecânicos, difíceis de operar e não geravam mais do que alguns poucos sons da fala. No entanto, serviram como ferramentas de experimentação para o estudo do mecanismo de produção da fala. Com o avanço tecnológico, sistemas eletroeletrônicos e *softwares* de síntese de fala foram sendo desenvolvidos. Na década de 1960, foi possível gerar fala a partir de um texto. A ideia, que no início parecia uma brincadeira, foi tomando corpo e encontra um extenso campo de aplicações no mundo atual.

É inegável o papel fundamental que a escrita tem na forma de comunicação humana. Entretanto, isso não significa que a mensagem escrita seja sempre a forma mais conveniente de se obter acesso a informações (EGASHIRA, 1992). Em diversas circunstâncias, não se pode interromper uma dada atividade para se ler um texto. Mas pode-se ouvi-lo, se for falado de forma correta e agradável. Por exemplo, ao dirigir não se pode desviar a atenção dos olhos e mãos para ler o jornal, mas pode-se ouvir as notícias no rádio. Na interação homem-máquina, mensagens de alerta faladas são possivelmente mais eficientes do que respostas visuais. Em um telefone comum, a única forma de acesso a informações é a partir da interação vocal. Sistemas que realizem a passagem do domínio fala para texto e vice-versa permitem o desenvolvimento de diversas aplicações em que o único meio de entrada e saída é a fala. O acesso a informações como saldo bancário, previsão de tempo e acompanhamento de processos torna-se, assim, viável.

Com esses exemplos, fica clara a necessidade de um processo automático de transformação de informações escritas em mensagens faladas. Esse mapeamento do texto para a fala é o objetivo dos sistemas de síntese de fala.

Para apresentar uma revisão desse tema, este artigo está assim organizado: na seção 2, apresenta-se uma contextualização histórica, desde os

sistemas mecânicos do século XVII até os sistemas computacionais atuais; a seção 3 apresenta uma classificação dos sistemas de síntese de fala; uma revisão sobre o funcionamento de sistemas de conversão texto-fala é discutida na seção 4; as conclusões e os comentários finais são apresentados na seção 5.

2. HISTÓRICO

A potencialidade de aplicações de sistemas de síntese de fala despertou, há longo tempo, um forte interesse nessa área. O histórico apresentado a seguir, baseado na literatura aberta (EGASHIRA, 1992; DUTOIT, 1997; LEMMETTY, 1999; RUBIN; VATIKIOTIS-BATESON, 2001; HUANG; ACERO; HON, 2001; KLATT, 1987), mostra a evolução dos sistemas de síntese de fala.

2.1. Sistemas mecânicos

Uma das primeiras tentativas de geração de fala sintética ocorreu em 1779, na Academia Imperial de São Petersburgo, na Rússia. O professor Christian Kratzenstein recebeu o prêmio anual ao explicar as diferenças fisiológicas entre cinco vogais longas ([a], [e], [i], [o] e [u]) e construir uma série de ressoadores acústicos[1]. A estrutura básica desses ressoadores é mostrada na Figura 1. Esses dispositivos eram similares à configuração do trato vocal humano e emitiam sons pelo uso de palhetas, como em instrumentos musicais.

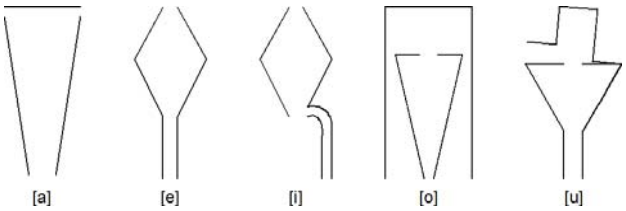


FIGURA 1 – Ressoadores de Kratzenstein.

Fonte: RUBIN; VATIKIOTIS-BATESON, 2001.

Em Viena, em 1791, Wolfgang von Kempelen apresentou o resultado de mais de 20 anos de pesquisa ao publicar o livro "O Mecanismo da Fala Humana e a Construção de uma Máquina Falante". A máquina, um equivalente mecânico do sistema articulatório, era capaz de produzir não só vogais, como palavras e até frases completas. As partes essenciais do dispositivo eram um fole, equivalente aos pulmões, uma palheta vibratória, atuando como as cordas vocais, e um tubo de couro, simulando o trato vocal. Alterando o formato do tubo, era possível produzir diferentes vogais. Obstruções feitas com os dedos em quatro pequenas passagens de ar permitiam a geração de sons consonantais. Na Figura 2, é apresentado um esboço da máquina de von Kempelen.

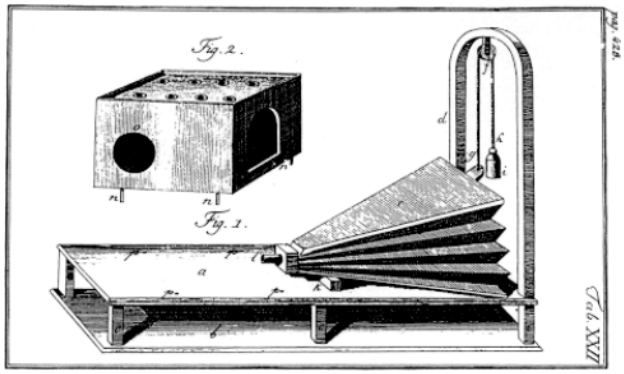


FIGURA 2 – Dispositivo mecânico de síntese de fala de von Kempelen.

Fonte: RUBIN; VATIKIOTIS-BATESON, 2001.

A máquina falante não foi levada tão a sério na época devido a um acontecimento que marcou negativamente seu criador. Enquanto trabalhava na construção da máquina falante, von Kempelen prometeu para a imperatriz Maria Theresa a criação de uma máquina automática para jogar xadrez. Em seis meses, ela estava pronta e operando (ONDREJOVIC, 2000). Infelizmente, o mecanismo principal da máquina era um hábil jogador de xadrez colocado no interior, o que arrasou a reputação de von Kempelen.

Na metade do século XIX, Charles Wheatstone construiu uma versão da máquina falante de von Kempelen. Essa, um pouco mais complexa, era capaz de produzir mais sons e combinações de sons. A conexão entre os sons vocálicos e a geometria do trato vocal foi estudada por Willis em 1838. Com ressoadores semelhantes aos de instrumentos musicais chamados órgãos de tubos, ele sintetizou diferentes vogais. Joseph Faber, em 1846, desenvolveu um sintetizador que, com maior controle de *pitch*[2], permitiu cantar *God Save the Queen*, em uma apresentação em Londres. No final do século XIX, Alexander Graham Bell e seu pai construíram também uma máquina de fala. Controversos foram os experimentos que Bell realizou com seu cão quando fazia estudos para a construção da máquina. Colocava-o entre as pernas, fazia-o rosnar e alterava a conformação do trato vocal com as mãos.

Outros experimentos baseados em sistemas mecânicos e semi-elétricos foram realizados até os anos de 1960, mas sem muito sucesso.

2.2. Sistemas eletroeletrônicos

O primeiro sintetizador eletroeletrônico de fala foi desenvolvido por Stewart, em 1922. Dois

[1] Uma versão moderna dos ressoadores de Kratzenstein pode obtida no endereço eletrônico Vocal Vowels (VOCAL VOWELS, 2001).

[2] *Pitch* é um aspecto subjetivo de um som, relacionado à percepção da freqüência.

circuitos ressonantes, excitados por uma cigarra elétrica, modelavam as duas frequências de ressonância mais baixas do trato vocal, gerando sons vocálicos. Não eram, no entanto, sintetizadas consoantes nem transições entre as vogais, impossibilitando a geração de palavras ou sentenças.

O primeiro dispositivo eletroeletrônico de síntese de fala capaz de gerar sons conectados foi desenvolvido nos Laboratórios Bell e apresentado por Homer Dudley e Richard Riesz na Feira Mundial de 1939, em Nova York. Chamado de VODER (*Voice Operating Demonstrator*), era também conhecido pelos cientistas como Pedro, em alusão ao imperador Dom Pedro II, que em 1876, ao usar um telefone em uma demonstração, exclamou: "Meu Deus! Ele fala!" (Science News Letter, 2000). O VODER consistia de chaves para seleção de uma fonte sonora ou de ruído, com controle da frequência fundamental a partir de um pedal. O sinal da fonte era transmitido por dez filtros passa-banda, com amplitudes controladas manualmente. Três chaves adicionais introduziam transientes, reproduzindo as consoantes plosivas. Um operador experiente e bem treinado era capaz de produzir frases. A inteligibilidade estava longe de ser considerada boa, mas o potencial de geração de fala sintética estava demonstrado. Um esquema do VODER é ilustrado na Figura 3.

Em 1951, nos Laboratórios Haskins, foi desenvolvido um sintetizador chamado *Pattern Playback*. Essa máquina realizava a função inversa de um espectrógrafo, gerando sons a partir dos padrões de um espectrograma.

Na Figura 4, é mostrado um diagrama esquemático do equipamento. Um espectrograma, desenhado com uma tinta especial sobre um filme transparente, era rastreado por um feixe de luz modulado por uma roda tonal. As porções de luz modulada selecionadas pelo espectrograma eram coletadas por um sistema óptico e fornecidas a um elemento fotossensível. A fotocorrente gerada era amplificada e enviada a um alto-falante. Os espectrogramas podiam ser utilizados tanto na forma original como desenhados manualmente, em formato simplificado e estilizado. Assim, era possível realizar experimentos para a determinação de evidências acústicas suficientes para a percepção de diferenças fonéticas. Uma das principais constatações foi a importância das transições entre fonemas. Apesar de a naturalidade ser prejudicada pelo *pitch* constante (gerado pela roda), a inteligibilidade era bastante razoável. Palavras de um conjunto de frases de teste alcançavam 95% de inteligibilidade se copiadas diretamente para o filme transparente e 85%, se simplificadas e estilizadas.

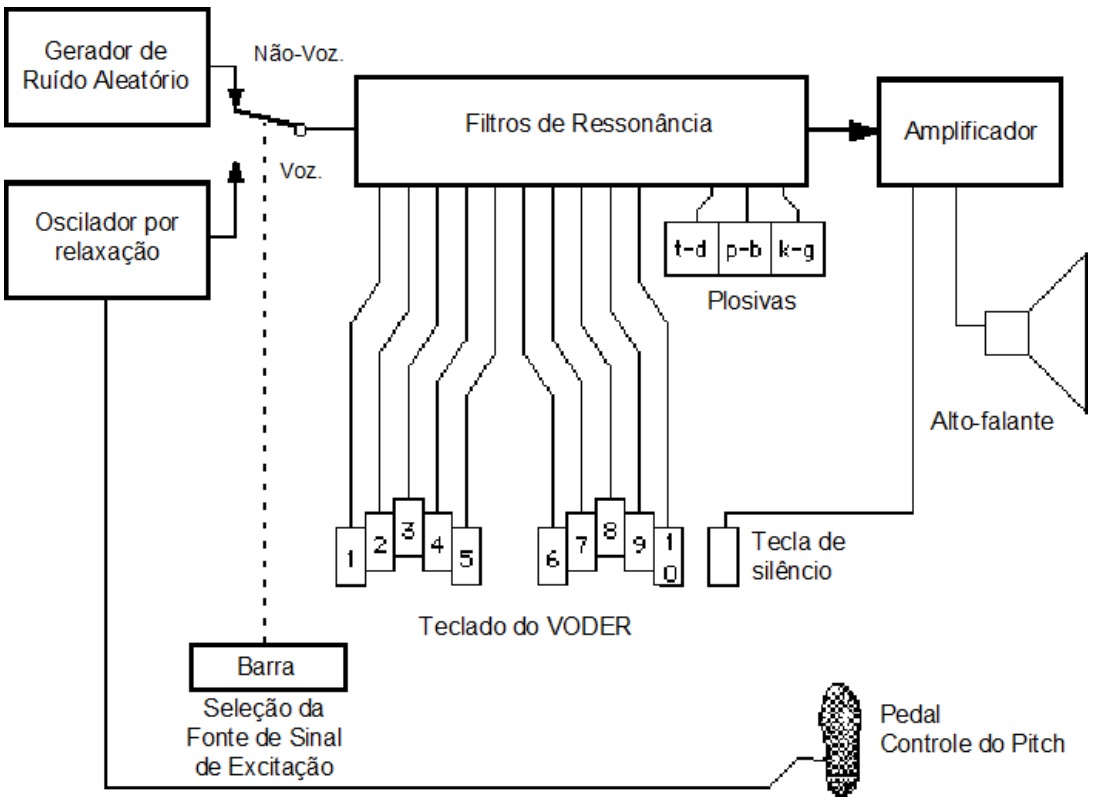


FIGURA 3 – Sintetizador VODER de 1939.

Fonte: RUBIN; VATIKIOTIS-BATESON, 2001.

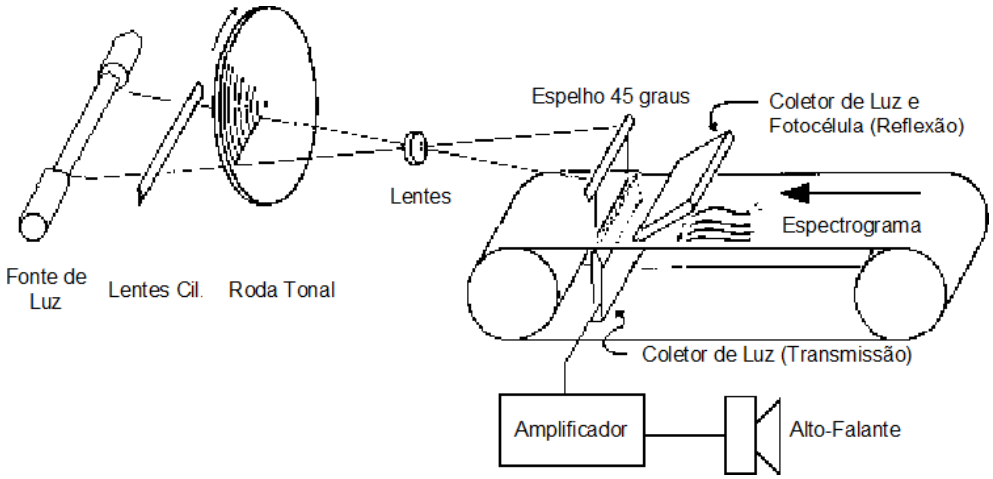


FIGURA 4 – Sistema *Pattern Playback* de 1951.

Fonte: RUBIN; VATIKIOTIS-BATESON, 2001.

O VODER e o *Pattern Playback* funcionavam a partir da cópia dos padrões espectrais da fala variantes no tempo. Uma melhor compreensão do processo de geração de fala, obtida com o desenvolvimento da teoria acústica da produção da fala realizado por Gunnar Fant, em 1960, e o consequente surgimento de sintetizadores articulatórios e por formantes, marcaram um novo passo na história da síntese de fala.

Os primeiros sintetizadores por formantes controlados dinamicamente surgiram em 1953: o PAT (*Parametric Artificial Talker*), de Walter Lawrence e o OVE I (*Orator Verbis Electris*), de Gunnar Fant. Enquanto, no PAT, os ressonadores eram conectados em paralelo; no OVE, a operação era em série.

O primeiro sintetizador articulatório foi desenvolvido por George Rosen, em 1958, no M.I.T. O DAVO (*Dynamic Analog of the Vocal Tract*) era controlado por gravações em fita de sinais de controle criados manualmente. Em 1968, Cecil Cooker desenvolveu regras para controle de um modelo articulatório. Paul Mermelstein e James Flanagan também trabalharam com síntese articulatória, em 1976.

Em 1968, Noriko Umeda, do Laboratório Eletrotécnico do Japão, desenvolveu o primeiro sistema completo de conversão texto-fala para a língua inglesa. Era baseado em um modelo articulatório e incluía um módulo de análise sintática. A fala era bastante inteligível, mas monótona.

Raymond Kurzweil, em 1976, criou uma máquina de leitura para cegos capaz de ler páginas de texto. Pesando 36 kg, o sistema não foi muito difundido devido ao alto custo. Em 1979, Dennis Klatt, Jonathan Allen e Sheri Hunnicut, todos do M.I.T., apresentaram o sistema MITalk. Dois anos depois, com uma nova e sofisticada fonte de sinal, foi lançado o Klattalk. Ainda em 1979, foi lançado o primeiro circuito integrado para síntese de fala: o *chip* Votrax. O circuito implementava um sintetizador de formantes em cascata.

No início dos anos 80, começaram a surgir sistemas TTS comerciais. Baseado no Klattalk, foi lançado, em 1982, o sistema Prose-2000 da Telesensory Systems. No ano seguinte, a Digital Equipment Corporation lançava o DECTalk.

O primeiro trabalho em síntese concatenativa foi realizado em 1968, por Red Dixon e David Maxey. Difones[3] eram parametrizados por frequências de formantes e concatenados. Em 1977, Joe Olive, nos Laboratórios Bell, concatenou difones usando predição linear. A Texas Instruments lançou, em 1980, um sintetizador, o *Speak-n-Spell*, usando um circuito integrado que realizava síntese baseada em LPC (*Linear Predictive Coding*). Esse *chip* foi usado em um brinquedo eletrônico e recebeu bastante atenção na época.

Sistemas concatenativos começaram a ganhar espaço em 1985, com o desenvolvimento da técnica de modificação prosódica PSOLA (*Pitch-Synchronous Overlap-and-Add*), proposta por Moulines e Charpentier, da France Telecom. Nos anos 90, pesquisadores nos laboratórios do ATR (*Advanced Telecommunications Research International Institute*), no Japão, lançaram os princípios para os sistemas baseados em grandes corpora, abordagem utilizada nos sistemas RealSpeak, da Lernout&Hauspie (TELECOM-MUNICATIONS INDUSTRY PRODUCT BACKGROUND, 2001) e NextGen, da AT&T (SYRDAL *et al*., 2000).

[3] Difones são segmentos do sinal de fala obtidos da metade de um dado fonema até a metade do fonema seguinte.

Um resumo das etapas do desenvolvimento histórico de síntese da fala é apresentado na Figura 5.

3. CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE SINTESE DE FALA

Os sistemas de síntese de fala podem ser divididos em duas classes, definidas pelo tamanho do vocabulário e pelo campo de aplicação. Na primeira classe estão os sistemas utilizados em aplicações que requerem pouca interação com o usuário, representados pelos sistemas de resposta vocal. Na segunda, a necessidade de interação com o usuário é alta, exigindo a utilização de sistemas de conversão texto-fala (*text to speech systems*). Os sistemas de resposta vocal operam com um vocabulário limitado (EGASHIRA, 1992) em aplicações, por exemplo, de serviços telefônicos como hora certa e despertador automático. Em uma primeira etapa, as mensagens requeridas para o serviço são definidas, gravadas e armazenadas. A operação de síntese de fala é realizada pela simples combinação e reprodução do que foi gravado. Em um sistema de saldo bancário, por exemplo, frases introdutórias como "bom dia", "boa tarde", "digite sua senha", "seu saldo é" e palavras básicas para a formação dos valores monetários como "um", "cem", "mil" são combinadas de forma adequada para a geração da resposta falada. Como vantagens dessa técnica, pode-se citar a alta qualidade que pode ser atingida e a pequena carga de processamento (VIEIRA; PACHECO, 2010). Entretanto, o domínio é restrito e bem definido, e a capacidade de armazenamento das mensagens é limitada pela memória disponível do sistema.

Já os sistemas de conversão texto-fala produzem fala sintetizada a partir de um texto de entrada com vocabulário irrestrito. Como o vocabulário é ilimitado, não é possível armazenar todas as combinações possíveis de palavras para posterior reprodução. A solução é realizar, inicialmente, uma análise de texto que identifique os sons correspondentes à representação escrita e associe parâmetros de entonação e ritmo. Em um segundo passo, a transformação dessa representação simbólica intermediária em sinal de fala é efetuada a partir de técnicas de processamento de sinais. Problemas ocorrem nas duas etapas: a análise de texto é uma tarefa difícil, pois nem sempre a mensagem escrita permite a especificação de todas as informações importantes para a fala, e a síntese do sinal, limitada por aspectos como a complexidade computacional, usualmente não permite a produção de fala com a mesma qualidade da natural.

A avaliação dos métodos de síntese de fala em diferentes aplicações é realizada a partir de três parâmetros básicos (RABINER, 1994):

a) qualidade, medida subjetivamente em termos de inteligibilidade e naturalidade;
b) flexibilidade, relacionada à capacidade de síntese de mensagens com diferentes palavras e diferentes entonações, velocidades e ênfases;
c) complexidade, medida em relação à carga de processamento computacional e capacidade de armazenamento requerida.

O sistema ideal proveria uma saída de alta qualidade, praticamente indistinguível da fala natural; produziria mensagens com qualquer padrão de entonação e ritmo de forma adequada; teria baixa complexidade para permitir a integração a um pequeno custo em qualquer ambiente de aplicação.

Infelizmente, não há nenhum sistema nos dias atuais que atenda completamente a esses três requisitos. Os sistemas de resposta vocal têm baixa complexidade e alta qualidade, mas não são capazes de lidar com texto irrestrito. Os sistemas *text-to-speech* (TTS), por sua vez, têm um custo computacional mais elevado e uma qualidade mais baixa. Mas são a única alternativa para a transformação de texto irrestrito em uma representação falada.

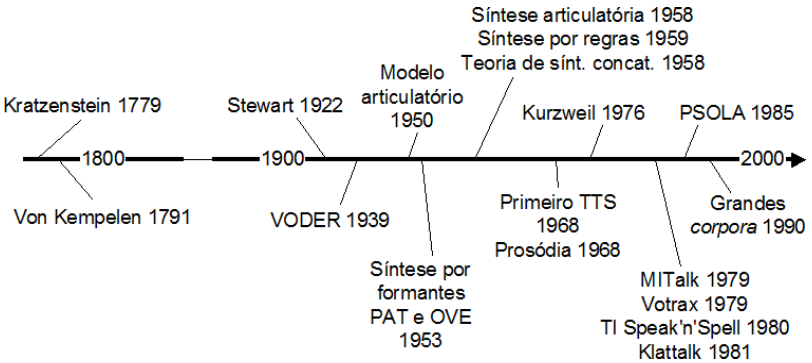


FIGURA 5 – Etapas do desenvolvimento histórico dos sistemas de síntese de fala.

Fonte: LEMMETTY, 1999 (adaptado).

4. SISTEMA TTS

O processo de conversão de um texto irrestrito em fala é bastante complexo e só pode ser resolvido de forma multidisciplinar. Os conhecimentos envolvidos na resolução do problema levam a uma divisão praticamente natural do processo em duas etapas:

a) passagem do domínio texto para um domínio de representação intermediário, baseada em técnicas de processamento de linguagem natural;
b) passagem do domínio intermediário para o domínio acústico do sinal de fala, baseada em técnicas de processamento de sinais.

Na Figura 6, é mostrado um diagrama dos blocos fundamentais de processamento envolvidos na tarefa de conversão texto-fala. Na primeira etapa, em que estão relacionados fundamentalmente aspectos linguísticos, o texto é analisado, sendo gerada uma representação fonética associada a informações prosódicas da fala que será sintetizada. Esse estágio de processamento é fortemente dependente do idioma a que se propõe o sistema de conversão e envolve, dentre outros, módulos de:

a) pré-processamento do texto de entrada, com a separação de blocos de análise, identificação e expansão de abreviaturas, siglas, algarismos;
b) transcrição ortográfico-fonética;
c) separação silábica e determinação da tonicidade;
d) análise sintática, com a classificação gramatical das palavras;
e) modelagem prosódica, que determina padrões de entonação e ritmo, acusticamente relacionados à frequência fundamental, duração e intensidade do sinal.

Ao final do processamento linguístico, os sons que devem ser sintetizados estão definidos. A síntese propriamente dita do sinal de fala é realizada na etapa de processamento de sinais. Um modelo de síntese deve permitir a geração dos sons e a alteração dos parâmetros prosódicos de acordo com o que foi prescrito na etapa de análise linguística. Os modelos que realizam a síntese podem ser classificados em dois paradigmas, de acordo com o domínio em que atuam (DUTOIT, 1997):

a) abordagem de sistema. Também chamada de síntese articulatória, nessa abordagem o próprio mecanismo de produção da fala é modelado, com maior ou menor detalhamento fisiológico;
b) abordagem de sinal. Também conhecida como *terminal-analogue synthesis*, modela o próprio sinal de fala, utilizando quaisquer meios convenientes. Oposta à abordagem de sistema, não implica a modelagem dos gestos articulatórios, e sim na representação do sinal acústico gerado pelo processo de produção da fala.

As duas abordagens evoluíram de forma independente, com resultados mais rápidos tendo sido obtidos com a modelagem do sinal, devido à relativa simplicidade (DUTOIT,1997). Enquanto a modelagem do complexo mecanismo de produção da fala é ainda um problema a ser resolvido, técnicas no domínio do sinal, como a de síntese por formantes e por predição linear, são empregadas em sistemas comerciais desde os anos 70.

Uma das técnicas da abordagem de sinal que apresenta melhores resultados é a de síntese por concatenação de segmentos de fala. Nessa técnica, segmentos do sinal de fala de tamanhos diversos são previamente gravados por um locutor e posteriormente concatenados para a geração de fala sintética. A ideia lembra um pouco a dos sistemas de resposta vocal, mas aqui os segmentos formam um conjunto que permite a síntese de qualquer texto. No processo de gravação desses segmentos, naturalmente estão associados uma entonação e ritmo relacionados ao contexto no qual o segmento está inserido.

Para conferir maior inteligibilidade e, principalmente, naturalidade à fala sintetizada, uma simples operação de concatenação dos segmentos não é suficiente. Torna-se, então, necessário modificar os parâmetros da fala associados à entonação e ao ritmo a partir de técnicas de processamento de sinais.

FIGURA 6 – Diagrama básico do processo de conversão de texto em fala.

4.1. Aplicações dos sistemas de conversão texto-fala

As aplicações que requerem a utilização de sistemas de conversão texto-fala são aquelas que exigem o tratamento de texto irrestrito em ambientes de interação homem máquina. Os sistemas de conversão texto-fala são uma alternativa interessante em situações em que (PAGE; BREEN, 1996):

a) o texto é imprevisível e dinâmico. Existem situações em que as mensagens que se deseja sintetizar são curtas, mas o conteúdo varia significativamente e não pode ser enquadrado em um formato padrão que permita a utilização de um sistema de resposta vocal. Nesses casos, o único método viável de síntese é o de conversão texto-fala;
b) é necessário acesso a um grande banco de dados. Não é viável realizar a gravação de todo o conteúdo de grandes bancos de dados, devido aos custos de gravação e armazenagem. Além disso, as informações estão sujeitas a alterações constantes;
c) a saída é relativamente estável, mas o custo de provimento e o tempo de resposta são críticos. Em sistemas telefônicos de atendimento, algumas mensagens permanecem constantes por longos períodos, mas, em certas situações, pode ser necessário modificá-las. A manutenção da mesma voz e o curto tempo disponível para a mudança favorecem o uso de sistemas TTS, quando comparados a novas gravações;
d) a consistência da voz é requerida. Muitos sistemas requerem a manutenção da voz para todas as mensagens. Não há problemas se, uma vez operando, não houver modificações. Entretanto, se a possibilidade de melhoramentos futuros for planejada, deve-se prever a disponibilidade do mesmo locutor. Nessas situações, a utilização de sistemas de conversão texto-fala deve ser considerada;
e) pequena ocupação de banda de transmissão é necessária. A transmissão de informação a partir de texto e posterior conversão para fala emprega uma banda de comunicação extremamente pequena.

Apresentadas as características das aplicações alvo, pode-se citar algumas delas (EGASHIRA, 1992; RABINER, 1994; DUTOIT, 1997; LEVINSON; OLIVE; TSCHIRGI, 1993; COX *et al*., 2000):

a) auxílio a portadores de deficiências. Incapacidades no processo de fala têm causas mentais ou motoras. Para o caso de problemas motores, os sistemas de conversão texto-fala podem atuar como um importante suporte. Com o auxílio de um teclado especial e um programa de montagem de sentenças, a geração de fala sintetizada pode permitir a comunicação. As aulas do astrofísico Stephen Hawking são proferidas dessa forma. Pessoas com deficiência visual podem ter acesso a informações escritas em formato eletrônico a partir de sistemas TTS. Aqueles com incapacidades auditivas e/ou de fala podem fazer ligações telefônicas e "conversar" normalmente se em cada extremo for utilizado um sistema de conversão de texto em fala e de fala em texto (reconhecimento de fala);
b) pesquisa básica e aplicada. Sintetizadores de fala são uma ferramenta muito interessante para linguistas, por uma característica peculiar: provêem um ambiente de total controle, permitindo que experimentos repetidos produzam resultados idênticos, o que é praticamente impossível com seres humanos. Assim, investigações relacionadas a modelos prosódicos, por exemplo, podem ser realizadas. Os sistemas TTS que são baseados nos parâmetros do trato vocal têm sido extensivamente utilizados por foneticistas para o estudo do processo de fala;
c) monitoramento com resposta vocal. Em certas situações, uma resposta vocal é mais eficiente do que uma mensagem escrita. Avisos de atenção ou perigo dados na forma falada têm um apelo mais forte. Poderiam ser utilizados, por exemplo, quando alguém se aproximasse de equipamentos ou áreas que oferecessem risco. A sobrecarga de informações visuais nas cabines de comando de aviões poderia ser aliviada com algumas mensagens faladas;
d) ensino de idiomas. Sistemas de alta qualidade podem ser utilizados para o aprendizado de idiomas, constituindo uma ferramenta muito valiosa;
e) livros e brinquedos falantes;
f) serviços em telecomunicações. Geralmente os serviços telefônicos usam bases de dados

com informações que variam constantemente, tornando adequado o emprego de sistemas de conversão texto-fala. O número de aplicações é muito grande e, dentre outras, pode-se citar: acesso às mensagens de correio eletrônico; auxílio à lista telefônica; informações sobre cursos, classificação em provas; resultados de exames médicos; acesso a informações como previsão meteorológica, eventos esportivos e culturais, feiras, exposições, programação de teatro e cinema; agenda e despertador automático; acesso a dicionários, enciclopédias e manuais de equipamentos; acompanhamento de processos ou pedidos de compras; informações bancárias.

4.2. Processamento linguístico

Na primeira etapa de um sistema texto-fala, é realizada a análise do texto de entrada. O objetivo é transformar o texto em uma representação simbólica e estruturada que indique os sons que devem ser sintetizados com seus parâmetros prosódicos associados. A análise de texto é fortemente dependente do idioma a que se propõe o sistema de conversão e é subdividida em módulos. Usualmente são incluídos os seguintes estágios de processamento:

a) pré-processamento do texto de entrada;
b) transcrição ortográfico-fonética;
c) separação silábica e determinação da tonicidade;
d) análise sintática;
e) modelagem prosódica.

Na Figura 7, é mostrado um diagrama de blocos das etapas envolvidas na análise de texto para conversão texto-fala.

4.2.1. Pré-processamento

A primeira função da etapa de pré-processamento é a separação do texto de entrada em grupos de palavras que facilitem o processo de análise. O grupo que parece mais evidente é a frase, e a maioria dos sistemas separa o texto em frases. Em alguns sistemas escritos, como o chinês, que possuem um símbolo exclusivo para assinalar o final de frases declarativas, não há dificuldades (em chinês, é usado um pequeno círculo) (SPROAT; OLIVE, 1995). Já em línguas como o inglês e o português, o processo não é tão direto. Nessas línguas, o mesmo sinal de ponto empregado para a marcação do final de frases declarativas é utilizado para assinalar, por exemplo, abreviaturas. Em português, o ponto em "Sr." não marca (normalmente) um final de frase mas sim corresponde à abreviatura de "Senhor". Assim, antes de definir um ponto como uma marca de separação de frases é necessário eliminar outras possibilidades. No caso de abreviaturas, essas devem ser identificadas e expandidas.

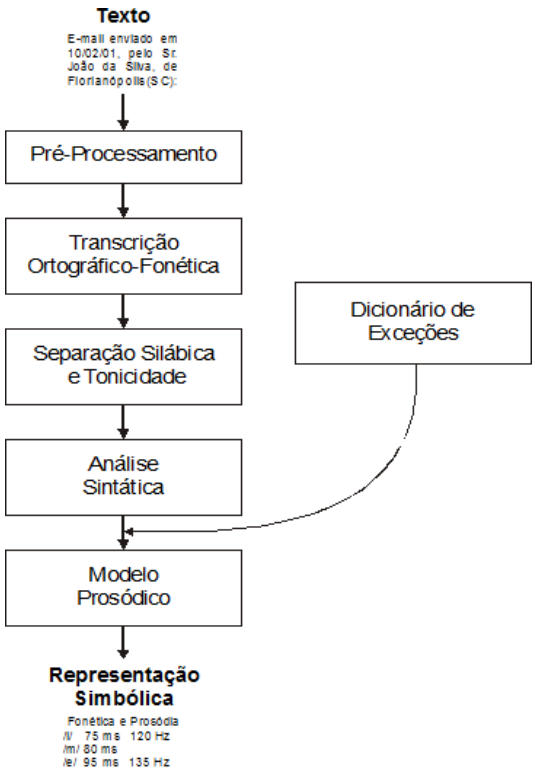


FIGURA 7 – Diagrama de blocos da etapa de análise do texto.

O processo de expansão de abreviaturas também não é trivial, pois muitas delas são usadas com diferentes significados. Por exemplo, "v." pode ser usado como abreviatura de "veja" ou de "verbo". A letra "s" sem ponto abrevia "segundo" ou "segundos" (outro problema é determinar se será usado o plural ou não) e, seguida de ponto, pode significar "substantivo" ou "Sul". "Sul" pode ser identificado se o texto foi escrito corretamente com o emprego de letras maiúsculas, pois a abreviatura correta é "S.". Contudo, atualmente é muito comum, principalmente em mensagens de correio eletrônico, o "esquecimento" dos caracteres maiúsculos. Além das abreviaturas, siglas são empregadas no texto. Algumas são soletradas, como "FGTS" que deve ser expandida para "efe gê tê esse". Outras podem ser lidas como se fossem palavras, pela identificação de padrões silábicos da língua, como é o caso de "CEF".

Os algarismos também devem ser expandidos de forma adequada. Algarismos arábicos são empregados em diversas situações e cada uma delas deve ser tratada separadamente. Por exemplo, "331" pode ser lido como "trezentos e trinta e um" quando representa uma quantidade qualquer ou como "três

três um" se for a primeira parte de um número telefônico. Os algarismos 1, 2 e as centenas de 200 até 900 apresentam um problema adicional: possuem uma variação feminina. Por exemplo, "542 éguas" deve ser expandido de forma diferente de "542 cavalos". As formas de valores monetários, números cardinais, datas e horas têm suas peculiaridades próprias e devem ser tratadas de modo apropriado. A expansão dos algarismos romanos também é necessária. Para alguns casos, não é tão simples. Por exemplo, "VI" pode representar o algarismo romano seis ou a primeira pessoa do singular do pretérito perfeito do indicativo do verbo "ver".

4.2.2. Transcrição ortográfico-fonética

O objetivo da transcrição é a transformação da representação ortográfica em uma representação fonética. Se, para cada caractere, existisse um mapeamento único no domínio fonético, essa tarefa seria simples. Entretanto, algumas letras representam mais de um fonema, como a letra "x", que, na língua portuguesa, descreve o fonema [ʃ] em "xale", [z] em "exame", [s] em "explicar" e os fonemas [ks] em "táxi". Além disso, o processo de transcrição fonética deve ser robusto o suficiente para lidar com nomes próprios, derivados de diferentes idiomas.

Diferentes estratégias podem ser utilizadas para a transcrição fonética. A mais simples é a transcrição por regras, baseada no contexto em que está inserida a letra em análise. Em português, em que a correspondência entre letras e fonemas é razoavelmente estável, esta é a técnica mais empregada (EGASHIRA, 1992; GOMES, 1998; COSTA NETO, 2000). Um dicionário de exceções com um número relativamente pequeno de verbetes – da ordem de 1000 – cobre as eventuais falhas de transcrição. Como exemplo de regras de conversão, pode-se citar a análise realizada para a letra "c", associada a dois fonemas, [k] e [s] (FIGUEIREDO; NAVINER; AGUIAR NETO, 1997):

a) se a letra seguinte ao "c" for "a", "o", "u" ou consoante, o fonema associado será [k], como, por exemplo, nas palavras "caco", "clube" e "cubo";
b) se a letra seguinte ao "c" for "e" ou "i", o fonema associado será [s], como nas palavras "certo" e "ciúme".

Uma outra abordagem usa um grande dicionário de radicais de palavras, prefixos e sufixos com uma transcrição fonética associada. Os casos não cobertos pelo dicionário são resolvidos com algumas regras de conversão letra-fonema. Para o inglês, normalmente essa é a abordagem utilizada. Dicionários com um número de entradas da ordem de dezenas de milhares de palavras são empregados (LEVINSON; OLIVE; TSCHIRGI, 1993).

Para a língua portuguesa, uma das maiores dificuldades na transcrição ortográfico fonética é determinar se as letras "e" e "o" sem acento ortográfico correspondem a vogais abertas ou fechadas (EGASHIRA, 1992). Esse problema ocorre porque nesses casos apenas o contexto lexical não é suficiente para a determinação correta da abertura ou fechamento da vogal. Por exemplo, para as palavras "bolo" e "bola" não há como desenvolver uma regra que atue apenas pela avaliação do contexto anterior e posterior em que se insere a vogal. A solução é, para esses casos, a inclusão dessas palavras em um dicionário de exceções.

4.2.3. Separação silábica e determinação da tonicidade

A sílaba desempenha um papel importante no estudo da prosódia. A implementação de um modelo prosódico pode ser facilitada se for efetuado um procedimento de separação silábica e determinação da tonicidade das sílabas.

Para o português, um algoritmo de separação silábica é apresentado em (EGASHIRA, 1992). É implementado através de um diagrama de estados e realiza a separação no nível dos fones.

A posição da sílaba tônica é uma informação importante a ser considerada na formulação dos modelos prosódicos, pois a variação dos parâmetros suprassegmentais é muito dependente da tonicidade.

Em Egashira (1992), é apresentado um procedimento de determinação da tonicidade das sílabas para o português baseado em regras. Apesar de não resolver todas as situações, as regras tentam abranger o maior número de casos possível. Citam-se, a título de exemplo, duas dessas regras:

a) palavras marcadas com diacríticos (acentos gráficos) já têm a sílaba tônica determinada, prevalecendo essa regra sobre todas as demais;
b) palavras terminadas em "im" ou "um" são oxítonas.

Além da tonicidade silábica, é muito importante considerar a tonicidade em níveis mais altos (entre palavras e dentro de uma frase). Por exemplo, nem todas as palavras de uma frase têm a mesma proeminência. Numa frase como "a moça gosta de torta de banana e de maçã" é possível perceber que algumas palavras são mais importantes para a comunicação e são ditas com um destaque maior do que as outras. Palavras de conteúdo, isto é, nomes, verbos, adjetivos, tendem a ser mais

salientadas do que as palavras funcionais, que incluem verbos auxiliares e preposições. Problemas podem ocorrer com os nomes compostos. Por exemplo, em inglês, "Madison Avenue" é acentuada foneticamente na última palavra, enquanto "Wall Street" na penúltima (SPROAT; OLIVE, 1995).

4.2.4. Análise sintática

A análise sintática determina a estrutura da frase e identifica os elementos que a compõem. A estrutura frasal é uma informação indispensável para uma modelagem prosódica correta das pausas, entonação e ritmo. Alguns pontos da frase correspondem a limites prosódicos, onde ocorrem mudanças abruptas de *pitch*, duração e intensidade. As pausas, por exemplo, não podem ser colocadas em qualquer ponto da frase.

Além disso, a determinação da categoria sintática de cada palavra é usada para eliminar a ambiguidade na pronúncia de alguns vocábulos. Tome-se como exemplo as frases:

a) O almoço será servido logo.
b) Eu almoço sempre ao meio-dia.

Nas duas frases, a palavra "almoço" é escrita da mesma forma, mas pronunciada de maneiras diferentes. Só é possível determinar a pronúncia correta através do conhecimento da categoria gramatical. Se for verbo, a vogal "o" é aberta, se substantivo, a vogal é fechada.

Duas abordagens são comuns para a tarefa de análise sintática: a primeira utiliza um classificador estocástico (EDGINGTON *et al*., 1996). Um modelo estatístico da linguagem é derivado de grandes conjuntos de texto classificado. Para cada palavra, é determinada uma categoria gramatical mais provável, dada a probabilidade de ocorrência das palavras dentro de um certo contexto; a segunda abordagem é baseada em regras gramaticais, que descrevem uma sequência válida de símbolos. Os símbolos correspondem a classes de palavras, grupos de palavras representando frases, orações ou mesmo frases inteiras.

4.2.5. Modelagem prosódica

A incorporação de prosódia a um sistema de síntese de fala é um fator fundamental para que os requisitos de inteligibilidade e naturalidade sejam atendidos. A prosódia é imposta à fala a partir da variação temporal dos parâmetros prosódicos *pitch*, duração e intensidade. O objetivo de um modelo prosódico é a determinação da evolução temporal dos parâmetros prosódicos, de forma que seja possível identificar na fala sintetizada os atributos linguísticos de acento, ritmo e entonação, que, em última análise, conferem uma avaliação de boa qualidade.

Uma estrutura comumente adotada é a separação do modelo prosódico em modelo de duração e modelo entonacional ou de *pitch*. Na literatura consultada, não foram encontradas referências ao desenvolvimento de um modelo específico de intensidade. É importante destacar que a modelagem prosódica é fortemente relacionada aos módulos precedentes de análise, principalmente os de determinação de tonicidade e de análise sintática.

Por modelo de duração aplicado à síntese de fala, entende-se qualquer tratamento automático pelo qual as durações dos fones de um enunciado a ser sintetizado possam ser determinadas (SILVA; VIOLARO, 1995). Várias abordagens têm sido empregadas e uma revisão das técnicas é encontrada em Santen (1995). Destaca-se, para o caso do português, o modelo desenvolvido em Gomes (1998), que emprega um dicionário de contornos de duração obtido a partir de dados extraídos da fala de um locutor. O contorno mais adequado é selecionado a partir do cálculo de um índice que leva em consideração a classificação gramatical do grupo prosódico em análise. Um ajuste do contorno geral é realizado a partir de regras que modelam os efeitos locais da duração. Como exemplo, cita-se uma regra de efeito local:

a) segmentos da sílaba final de uma palavra têm suas durações aumentadas por um fator de 1,08 para vogais e de 1,05 para consoantes, com exceção de [p].

Em relação aos modelos entonacionais, diferentes abordagens têm sido propostas na literatura, baseadas nos três níveis de análise dos fenômenos prosódicos: nível acústico, perceptual e linguístico. Cada modelo tem seu grau de complexidade e de relacionamento com os outros módulos de análise e um consequente grau de qualidade perceptual. Uma boa revisão das várias abordagens empregadas é encontrada em Dutoit (1997). Para o português, Silva e Violaro (1995) apresentam um modelo cuja principal característica é basear-se em uma estrutura hierárquica de sentença, composta pelos níveis de frase, constituinte prosódico, palavra, sílaba e fone. Nessa abordagem, cada nível obedece às regras do nível superior e gera outras regras para o nível inferior. No nível de frase, são estabelecidos limites de variação superior e inferior de *pitch* para a elocução. O contorno é aperfeiçoado dentro desses limites até chegar ao último nível, no qual estarão definidos os valores inicial e final de *pitch* para cada fone.

4.3. Processamento de sinais

Após a etapa de processamento linguístico, já são conhecidos os sons que devem ser sintetizados e os parâmetros prosódicos que devem ser aplicados. É realizada, então, a síntese do sinal acústico de fala. As abordagens mais utilizadas para a síntese propriamente dita são:

a) abordagem de sistema, também conhecida como síntese articulatória, em que o próprio mecanismo de produção da fala é modelado;
b) abordagem de sinal, em que o sinal de fala é o objeto de representação. A síntese por formantes e a síntese por concatenação figuram nessa abordagem.

4.3.1. Síntese articulatória

A síntese articulatória tem por objetivo reproduzir o sinal de fala, modelando os mecanismos de sua produção natural (GABIOUD, 1994). É potencialmente o melhor método para a geração de fala sintética de alta qualidade. Ao mesmo tempo, o de implementação mais complexa, por depender de uma ampla compreensão do processo de produção da fala, e o mais custoso computacionalmente (LEMMETTY, 1999).

Nesta abordagem, a produção dos sons da fala, partindo da glote até os lábios, é modelada em diferentes passos. Inicialmente, é necessário criar um modelo para a fonte primária da voz humana, a vibração das cordas vocais. O formato do trato vocal é delineado em seguida, a partir da determinação da função área. Essa função é definida como a área instantânea da seção reta do trato vocal, da glote aos lábios, determinada pelo posicionamento dos articuladores (PRADO, 1993). A estimação da função área pode ser realizada de duas formas:

a) diretamente pela observação da fala a partir de raios X ou ressonância magnética;
b) a partir de um mapeamento inverso ou acústico/articulatório, utilizando um processo analítico (PRADO, 1993).

Na última etapa, é realizada a modelagem do movimento dos lábios. Esse modelo é essencial se a aplicação possibilitar também a síntese visual, que contribui para uma melhor compreensão da mensagem em situações ruidosas (GABIOUD, 1994).

Como exemplo de parâmetros articulatórios de controle, pode-se citar o modelo descrito em Bickley, Stevens e Williams (1996) que utiliza: a área da abertura dos lábios, a constrição formada pela lâmina da língua, a abertura para as cavidades nasais, a área glotal média e a taxa de expansão ou contração ativa do volume do trato vocal na parte posterior de uma constrição.

Atualmente, a síntese articulatória deve ser considerada mais como uma ferramenta de pesquisa do que uma alternativa viável para aplicações comerciais (GABIOUD, 1994). Mesmo os sistemas no estado-da-arte não são capazes de gerar fala com a qualidade dos outros métodos baseados na abordagem de sinal.

4.3.2. Síntese por formantes

A síntese por formantes, também conhecida por síntese paramétrica, é baseada no modelo fonte-filtro de produção da fala. O processo físico é descrito matematicamente pela combinação linear de três componentes: fontes de sinal, característica de filtragem do trato vocal e característica de radiação para o meio externo, conforme o diagrama de blocos mostrado na Figura 8.

A principal característica da síntese por formantes é a implementação da função de transferência do trato vocal a partir da associação de seções de segunda ordem. Essas seções são conhecidas como ressonadores. A estrutura do ressonador digital de segunda ordem é ilustrada na Figura 9.

Os ressonadores podem ser associados em cascata ou paralelo. Para utilizar as melhores características de cada uma das associações, algumas implementações híbridas foram propostas na literatura Gomes (1998) e Klatt (1980). Uma das mais conhecidas é a mostrada na Figura 10, o sintetizador de Klatt (1980). Nesse modelo, a função de transferência do trato vocal em cascata é implementada pelos ressonadores R1 a R5. A síntese de sons nasais é efetuada com um ressonador adicional RNP e por um anti-ressonador RNZ.

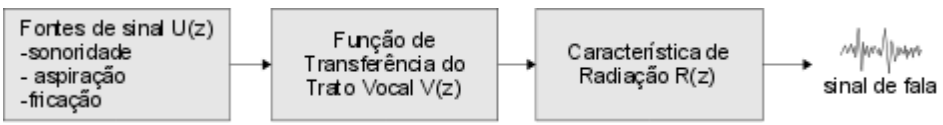


FIGURA 8 – Esquema simplificado do processo de produção da fala empregado na síntese por formantes.

Na configuração em paralelo, sete ressonadores estão disponíveis (R1, ..., R6, RNP), cada um com um controle de ganho associado (A1, ..., A6, AN). Uma conexão de *by-pass*, com um controle de ganho AB, permite a simulação de sons que não têm características de ressonância bem definidas (STYGER; KELLER, 1994). A chave SW controla a mudança entre a estrutura em série e paralelo.

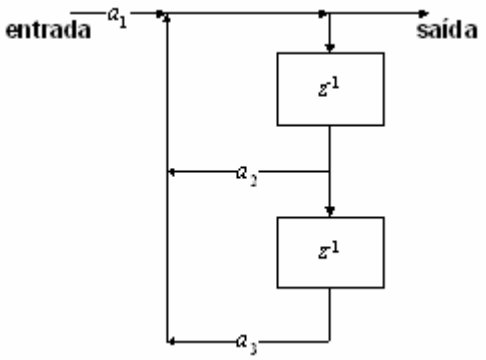


FIGURA 9 – Estrutura do ressonador digital de segunda ordem.

A implementação das fontes pode produzir dois tipos de excitação: sonora e ruidosa. Para sons vozeados, ainda é possível gerar duas excitações. Na primeira, o modelo consiste em um trem de pulsos, conformado por um filtro passa-baixas RGP que impõe um decaimento espectral de –12 dB/oitava. O resultado é um sinal que se assemelha aos pulsos glotais naturais. O anti-ressonador opcional RGZ modifica alguns detalhes espectrais do sinal. A segunda alternativa de fonte vozeada gera um sinal quase-senoidal utilizado para a geração das fricativas vozeadas. Um decaimento de –24 dB/oitava é obtido com um segundo filtro RGS.

A fonte de ruído simula o ruído de turbulência produzido pela passagem do ar por uma constrição (EGASHIRA, 1992). Se a constrição está localizada no nível das cordas vocais, o ruído é de aspiração, com ganho controlado por AH. Se a constrição está acima da laringe, o ruído é de fricação, com amplitude controlada por AF. A saída do gerador de números aleatórios, com espectro aproximadamente plano, é passada por um filtro passa-baixas LPF que cancela o efeito da radiação nos lábios. Uma modulação de amplitude do ruído é realizada pelo modulador MOD.

A característica de radiação nos lábios é implementada por um diferenciador de primeira ordem.

O controle do sintetizador é efetuado a partir de 39 parâmetros, atualizados a cada 5ms. Na configuração padrão, o sistema opera com uma taxa de amostragem de 10 kHz.

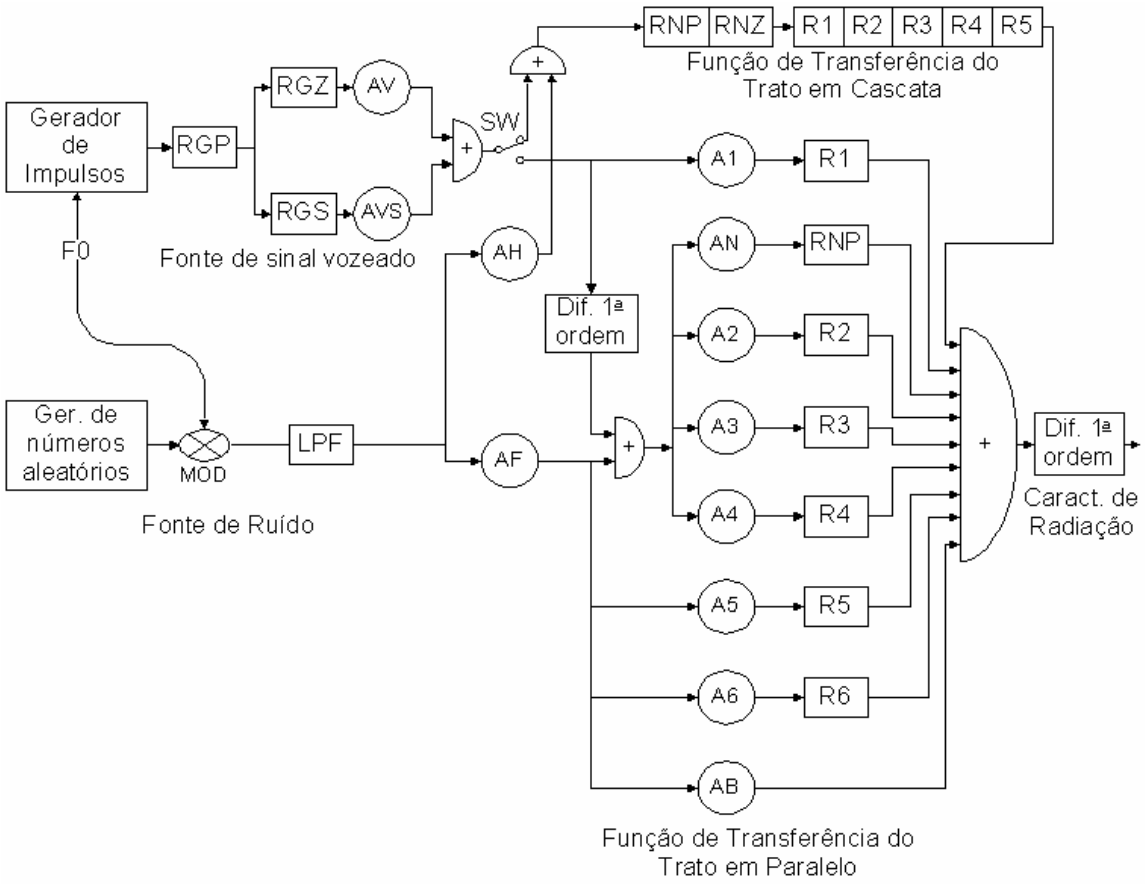


FIGURA 10 – Diagrama do sintetizador de Klatt (1980).

A síntese baseada em regras é uma abordagem poderosa para síntese de fala. É possível gerar fala sintetizada de alta qualidade desde que os parâmetros de controle sejam ajustados de forma correta. A flexibilidade também é um ponto forte. Novas vozes e diferentes efeitos podem ser criados facilmente. Entretanto, a grande dificuldade se encontra na obtenção dos parâmetros de controle, principalmente para a transição entre sons diferentes. A metodologia mais empregada é a de, tomando como referência frases produzidas naturalmente, obter e ajustar os parâmetros por tentativa e erro. O desenvolvimento torna-se lento, sendo comum o esforço de vários anos para obter uma boa qualidade (DUTOIT, 1997). Alguns trabalhos, como os de Huang, Acero e Hon (2001) buscam a obtenção dos parâmetros de forma automática, empregando técnicas inicialmente utilizadas em reconhecimento de fala, como os modelos ocultos de Markov (HMM).

4.3.3. Síntese concatenativa

Em síntese concatenativa, fala sintética é produzida pela concatenação de segmentos. Esses segmentos são previamente gravados e armazenados formando um banco de unidades. A escolha dos segmentos necessários para a geração de uma dada elocução baseia-se nas informações obtidas a partir da etapa de processamento linguístico. Com uma etapa de concatenação e alteração de parâmetros prosódicos, a fala sintetizada é gerada. O diagrama de blocos desse processo é mostrado na Figura 11.

Em oposição à síntese por formantes, aqui não há necessidade de definição de regras de transição entre sons, pois essas podem estar incorporadas aos segmentos armazenados. Cada segmento é obtido de uma gravação de um locutor, e um resultado de alta qualidade poderia ser esperado. Contudo, problemas podem ocorrer, fazendo com que os sistemas concatenativos sofram de uma grande variação de qualidade: em uma sentença, o resultado é excelente, mas na seguinte, pode ser sofrível. Se a combinação das unidades em uma frase sintética é adequada, o resultado é tão bom quanto o obtido naturalmente em uma gravação. Mas, se ocorrem muitas descontinuidades espectrais entre os segmentos, a qualidade torna-se baixa.

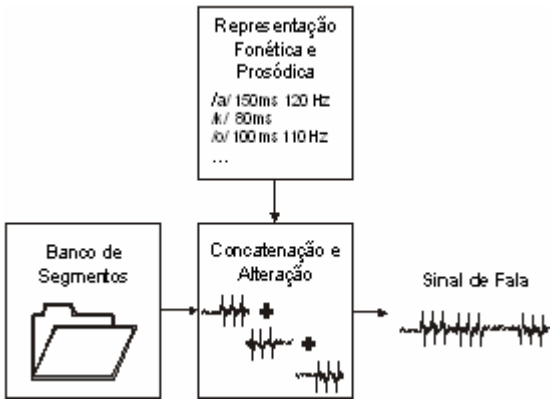


FIGURA 11 – Diagrama de blocos da síntese do sinal de fala pela técnica concatenativa.

As descontinuidades espectrais ocorrem quando os formantes de segmentos adjacentes não têm os mesmos valores e estão relacionadas, principalmente, à coarticulação, que pode ser entendida como a influência de um fonema sobre outro.

Na etapa de modificação prosódica, também podem ocorrer perdas de qualidade dependendo das técnicas que são utilizadas. Com esses problemas, os ouvintes avaliam a fala sintética de forma negativa, mesmo com os segmentos sendo obtidos de forma natural.

Assim, pode-se dizer que o resultado final em síntese por concatenação é fortemente dependente dos seguintes fatores:

a) "qualidade" do banco de segmentos;
b) técnicas de concatenação e alteração prosódica.

Por sua vez, a montagem do banco de unidades, num estágio anterior à concatenação, envolve etapas de:

a) escolha dos segmentos;
b) definição do corpus1 de extração das unidades;
c) gravação;
d) segmentação.

Essas etapas são mostradas na Figura 12.

FIGURA 12 – Etapas envolvidas na criação de um banco de unidades para síntese concatenativa.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma revisão dos sistemas de síntese de fala, com ênfase nos sistemas de conversão texto-fala. Uma contextualização histórica foi apresentada, além de uma revisão detalhada das aplicações e módulos necessários para uma adequada conversão.

REFERÊNCIAS

BICKLEY, C. A.; STEVENS, K. N.; WILLIAMS, D. R. A Framework for Synthesis of Segments Based on Pseudoarticulatory Parameters. In: SANTEN, J. P. H. van et al. (Ed.). **Progress in Speech Synthesis**. New York: Springer-Verlag, 1996. p. 211-220.

COSTA NETO, M. L. da. **Conversor Texto-Fala de Alta Qualidade para a Língua Portuguesa**. Campina Grande, 2000. 112 p. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba.

COX, R. V. *et al*. **Speech and Language Processing for Next-Millennium Communications Services**. Proceedings of the IEEE, v. 88, n. 8, p. 1314-1337, Aug. 2000.

DUTOIT, T. **An Introduction to Text-to-Speech Synthesis**. Dordrecht: Kluwer, 1997. (Text, Speech and Language Technology, v. 3).

EDGINGTON, M. *et al*. **Overview of current text-to-speech techniques**: Part I - text and linguistic analysis. BT Technology Journal, v. 14, n. 1, p. 68-83, Jan. 1996.

EGASHIRA, F. **Síntese de voz a partir de texto para a língua portuguesa**. Campinas, 1992. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas.

FIGUEIREDO, F. A.; NAVINER, L. A. B.; AGUIAR NETO, B. G. **Uma Nova Abordagem para o Sistema de Conversão Texto-Fala para a Língua Portuguesa**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 15., 1997, Recife. Anais... p. 328-331.

GABIOUD, B. Articulatory Models in Speech Synthesis. In: KELLER, E. (Ed.). **Fundamentals of speech synthesis and speech recognition**: basic concepts, state of the art and future challenges. Chichester: J. Wiley, 1994. p. 215-230.

GOMES, L. de C. T. **Sistema de conversão texto-fala para a língua portuguesa utilizando a abordagem de síntese por regras**. Campinas, 1998. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas.

HUANG, X.; ACERO, A.; HON, H. Spoken **Language Processing**: A Guide to Theory, Algorithm, and System Development. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

KLATT, D. H. Software for a cascade/parallel formant synthesizer. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 67, n. 3, p. 971-995, Mar. 1980.

KLATT, D. H. Review of text-to-speech conversion for English. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 82, n. 3, p. 737-793, Sept. 1987.

LEMMETTY, S. **Review of Speech Synthesis Technology**. Espoo, 1999. 104 p. Master Thesis (Master of Science) – Department of Electrical and Communications Engineering, Helsinki University of Technology.

LEVINSON, S. E.; OLIVE, J. P.; TSCHIRGI, J. S. Speech Synthesis in Telecommunications. **IEEE Communications Magazine**, v. 31, n. 11, p. 46-53, Nov. 1993.

Now a Machine That Talks With the Voice of Man. **Science News Letter**, 14 Jan. 1939. p.19. Disponível em: <http://www.americanhistory.si.edu/scienceservice/newsletters/39019p.htm> Acesso em: 05 mar. 2000.

ONDREJOVIC, S. **Wolfgang Von Kempelen and his "Mechanism of Human Speech"**. Disponível em: <http://www.slovakradio.sk/kultura/expstudio/kempe.html> Acesso em: 10 mar. 2000.

PAGE, J. H.; BREEN, A. P. The Laureate text-to-speech system: architecture and applications. **BT Technology Journal**, v. 14, n. 1, p. 57-67, Jan. 1996.

PRADO, P. P. L. do. **Sintetizador Articulatório de Voz**: Mapeamento Acústico/Articulatório. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES, 11., 1993, Natal. Anais... v. I, p. 708-712.

RABINER, L. R. **Applications of Voice Processing to Telecommunications**. Proceedings of the IEEE, v. 82, n. 2, p. 199-228, Feb. 1994.

RUBIN, P.; VATIKIOTIS-BATESON, E. **Talking Heads**. Disponível em <http://www.haskins.yale.edu/Haskins/HEADS/contents.html> Acesso em 15 fev. 2001.

SANTEN, J. P. H. van. Computation of Timing in Text-to-Speech Synthesis. In: KLEIJN, W. B.; PALIWAL, K. K. (Ed.). **Speech Coding and Synthesis**. Amsterdam: Elsevier, 1995. p. 663-684.

SILVA, C. H.; VIOLARO, F. **Modelamento Prosódico para Conversão Texto-Fala do Português Falado no Brasil**. Revista Brasileira de Telecomunicações, Campinas, v. 10, n. 1, p. 15-24, dez. 1995.

SPROAT, R.; OLIVE, J. **An Approach to Text-to-Speech Synthesis**. In: KLEIJN, W. B.; PALIWAL, K. K. (Ed.). Speech Coding and Synthesis. Amsterdam: Elsevier, 1995. p. 611-632.

STYGER, T.; KELLER, E. Formant Synthesis. In: KELLER, E. (Ed.). **Fundamentals of speech synthesis and speech recognition**: basic concepts, state of the art and future challenges. Chichester: J. Wiley, 1994. p. 109-128.

SYRDAL, A. K. *et al*. **Corpus-Based Techniques in the AT&T NextGen Synthesis System**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SPOKEN LANGUAGE PROCESSING, 6., 2000, Beijing. Disponível em: <http://www.research.att.com/projects/tts/papers/2000_ICSLP/corpus.pdf> Acesso em 20 dez. 2000.

TELECOMMUNICATIONS Industry Product Backgrounder. Disponível em: <ftp://ftp.lhsl.com/uk/pr/backgrounders/telecom_bg.pdf> Acesso em: 16 fev. 2001.

VIEIRA, J.; PACHECO, F. S. **Desenvolvimento de um módulo de resposta vocal para a plataforma microcontrolada Arduino**. In: I CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E PÓS-GRADUAÇÃO SUL BRASIL, 2010, Florianópolis. Anais....

VOCAL Vowels: Exploratorium Exhibit. Disponível em: <http://www.exploratorium.edu/exhibits/vocal_vowels/vocal_vowels.html> Acesso em: 15 fev. 2001.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

OS CONSTRUCTOS TEÓRICOS EPISTEMOLÓGICOS CTS POSSIBILITAM A SUPERAÇÃO "BEHAVIORISTA E FUNCIONALISTA" DOS CURSOS SUPERIORES DE TECNOLOGIA?

Muriel Bittencourt de Liz[1], Luiz Alberto de Azevedo[2]

Resumo: Este artigo tem a premissa de problematizar se os constructos teóricos epistemológicos CTS possibilitam a superação dos atuais modelos "behavoristas e funcionalistas" dos Cursos Superiores de Tecnologia (CST), conforme manifestação externalizada pelo Ministério da Educação (MEC), assim como a fragmentação de seus currículos, impedindo aos alunos de adquirirem condições de autonomia intelectual que os possibilitem transitar pelos diferentes tipos de conhecimentos, em prol de um perfil profissional sociotécnico. Pretendemos demonstrar que essa manifestação por parte desse ministério é contraditória, porque além de negar CST como uma possibilidade de formação social e profissional, densa, alia-se a conselheiros do Conselho Nacional de Educação (CNE) induzindo-o a elaboração de Pareceres, e ainda que essa educação tem sido utilizada por representantes de partidos políticos como instrumento compensatório para uma determinada parcela da sociedade brasileira: "Educação para os filhos dos outros". Em nossa visão uma prática educativa orientada por tais premissas, além de aprofundar a institucionalização da exclusão social, afasta-se de uma possível educação laica para um movimento encaminhado apenas a um ensino estreito, fundada no aspecto utilitarista e pragmático da educação negando a essência maior do ato educativo, e desconsiderando a pronta inserção dos conceitos de politecnia e omnilateralidade de forma articulada, como ato pleno de formação do ser social que rebaixado a visão governamental equivocada de Educação Tecnológica sendo apropriada ora como "mercadoria-educação" e ora como "educação-mercadoria".

Palavras-chave: Ciência. Tecnologia. Educação tecnológica. Curso superior de tecnologia. Sociedade.

***Abstract**: This paper has the premise of problematize the Science-Technology-Society theoretical-epistemological constructs enable the overcoming of "behaviorist and functional" present models of Technological Graduation Courses (TGC), according to manifestations by Ministry of Education of Brazil, as well as fragmentation of their curricula, preventing students of acquiring intellectual autonomy that allow them to transit by different fields of knowledge, towards a sociotechnical profile. We intend do demonstrate that this manifestation emanated by this Ministry is contradictory, because besides denying TGCs as a path of a dense social and professional education, it allies with the Counselors of National Education Council (NEC), inducing them to elaborate opinions, and yet that this education has been used by political representatives as compensatory instrument for a particular portion of Brazilian society: "Education for the children of others". In our point of view, a educational practice oriented by such premises, besides deepening the institutionalization of social exclusion, departs of a possible laic education to a movement towards a narrow education, founded in the utilitarian and pragmatic aspect of education, denying the broader essence of the educational act, and disregarding the insertion of concepts like "polytechnics" and "omnilaterality" in a articulate way, as a complete act of education of the social being that demoted to a equivocated governmental view of Technological Education being appropriated as "commodity-education" or as "education-commodity.*

***Keywords**: Science, technology, technological education. Technological graduation course. Society.*

[1] Professor do DAELN do *campus* Florianópolis do IF-SC <muriel@ifsc.edu.br>.
[2] Professor do DAELN do *campus* Florianópolis do IF-SC <lazevedo@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

Para uma visão de como ocorreu à institucionalização da Educação Tecnológica na territorialidade do Estado brasileiro, considerando o estágio atual contemporâneo, desenvolvemos um recorte na linha do tempo da historicização sobre a educação brasileira, retornando a 1910, quando Nilo Peçanha instalou 19 "Escolas de Aprendizes Artífices" destinadas "aos pobres e humildes". Autores que pesquisam e escrevem sobre o tema, compreendem que essas escolas eram similares aos Liceus de Artes e Ofícios, e tinham por premissa o ensino industrial. Essa historicidade, todavia, está descrita na tese de Gurgel (2007, p.56), "A trajetória da Escola de Aprendizes e Artífices de Natal: república, trabalho e educação (1909-1942)", ao concluir que "as primeiras experiências de ensino profissional, anteriores a 1909, foram as quatro escolas fundadas nas cidades de Campos, Petrópolis, Niterói e Paraíba do Sul no Rio de Janeiro (via Decreto no 1.004, de 11 de dezembro de 1906)", por Nilo Peçanha.

A autora ainda destaca desse processo histórico sobre o desenvolvimento inicial da educação profissional e tecnológica brasileira, que "aproximadamente três anos depois das primeiras instituições fundadas no Rio de Janeiro, pelo Decreto no 7.566, de 23 de setembro de 1909, o então presidente da República Nilo Peçanha criou as 19 Escolas de Aprendizes e Artífices" (2007, p.56). Gurgel (2007, p.58), todavia, destaca que o objetivo dessa ação não desponta como uma ação governamental preocupada com o desenvolvimento igualitária da sociedade, na época, mas sim fruto de uma ação que "se refere aos novos problemas que o País atravessava como o processo de crescimento urbano", e ainda que "havia a necessidade de disseminar na população de trabalhadores a ideia de vender sua força de trabalho e destiná-los ao exercício de atividades que lhes permitissem adquirir hábitos de trabalho profícuo".

Observamos ainda que essa modalidade de educação que se relaciona às interpretadas "escolas vocacionais e pré-vocacionais", como um "dever do Estado" foi tratada no caput do artigo 129 da Constituição dos Estados Unidos do Brasil de 1937, no governo federal de Getúlio Vargas, nos seguintes termos: "À infância e à juventude, a que faltarem os recursos necessários à educação em instituições particulares, é dever da Nação, dos Estados e dos Municípios assegurar, pela fundação de instituições públicas de ensino em todos os seus graus", porém, uma educação compreendida como "adequada às suas faculdades, aptidões e tendências vocacionais". Esse governo federal em 1937, ainda manifesta seu pensamento a respeito do tipo de educação que o Estado deveria assumir com relação às classes menos favorecidas, fundando institutos de ensino profissional e subsidiando os de iniciativa dos Estados e Municípios, e os dos indivíduos ou associações particulares e profissionais.

Nascia, assim, a semente da Rede Federal de Educação Tecnológica no Brasil que possuía o compromisso com o "ensino profissional, primário e gratuito". Sobre essa visão sobre a trajetória da educação profissional brasileira, Pereira (2008, p.63), pesquisando a "(Im)Possibilidades da construção de uma educação emancipadora em cursos tecnológicos: uma abordagem a partir de dois cursos localizados em Goiânia e Anápolis", compreende que "a grande marca do início do período republicano foi a profusão de reformas, as quais visavam reestruturar o sistema educacional brasileiro, sem, contudo, realizar mudanças estruturais significativas que pudessem alterar a lógica excludente que prevalecia até então". Conclui que, "contrariamente, as reformas acabavam por realizar pequenas acomodações de interesse que, no final, mantinham intactas as relações duais e desiguais", e ainda explicita algumas dessas reformas personalistas, como: as reformas de "Benjamin Constant (1890), Epitácio Pessoa (1901), Rivadávia Corrêa (1911), Carlos Maximiliano (1915), João Luis Alves (1925)" (PEREIRA, 2008, p.63).

Neves e Pronko (2008, p.33), abordando a questão da rede de Escolas de Aprendizes Artífices, criadas pelo Decreto no 7.566/1909, declaram que o governo, ao instituí-la estava fundamentado numa evidente intencionalidade "moralizadora", justificada mediante as seguintes considerações apresentadas: a) que o aumento constante da população das cidades exige que se facilite às classes proletárias os meios de vencer as dificuldades sempre crescentes da luta pela existência; b) que para isso se torna necessário, não só habilitar os filhos dos desfavorecidos da fortuna com o indispensável preparo técnico e intelectual, como fazê-lo adquirir hábitos de trabalho profícuo, que os afastará da ociosidade, escola do vício e do crime; e c) que é um dos deveres do Governo da República formar cidadãos úteis à Nação.

Verificamos que o Estado não assume de fato para si, já desde aquela época, o compromisso com a educação dos brasileiros e, ainda, aprofunda a mercadorização dessa modalidade de educação, empurrando-a para a iniciativa privada. Essa visão também está externalizada pelos conselheiros do Conselho Nacional de Educação (CNE), Parecer CNE/CEB no 16/1999 (p.280), ao declararem que "essa obrigação do Estado deveria ser cumprida com a 'colaboração das indústrias e dos sindicatos econômicos', as chamadas 'classes produtoras', que

deveriam 'criar, na esfera de sua especialidade, escolas de aprendizes, destinadas aos filhos de seus operários ou de seus associados'".

O perfil institucional dessas 19 escolas, todavia, foi alterado no transcorrer da temporalidade por governos federais do Estado brasileiro, assumindo outras atribuições sociais, como a destacada no caput do artigo 37, da Lei nº 378/1937, durante o governo Vargas, que transformou as Escolas de Aprendizes Artífices em Liceus Profissionais, incumbindo-os da propagação do ensino profissional de todos os ramos e graus e, ainda, por todo o território brasileiro. Esse mesmo governo, em 1942, modifica o perfil dessa Rede, via o Decreto-Lei nº 4.073, instituindo a Lei Orgânica do Ensino Industrial, e, posteriormente, publica o Decreto-Lei nº 8.680/1946, definindo o ensino industrial como "o ramo do ensino, de segundo grau, destinado à preparação profissional dos trabalhadores da indústria e das atividades artesanais, e, ainda, dos trabalhadores dos transportes, das comunicações e da pesca".

Em 1942, mediante a edição do Decreto-Lei nº 4.127, o Presidente Vargas estabelece as bases para um novo (re)ordenamento relativo à organização das escolas, até então denominadas de Liceus, e respectiva transformação dessas em Escolas Industriais e Técnicas, na premissa de atender às demandas decorrentes do processo de industrialização do Brasil, porém, direcionadas às camadas desfavorecidas da sociedade. Posteriormente, em 1959, o governo publica o Decreto no 47.038, definindo um novo ordenamento para a Rede Federal, mediante o estabelecimento de um "Regulamento do Ensino Industrial", com vista a proporcionar base cultural e iniciação técnica, voltada ao trabalho produtivo.

Tratava-se de uma mudança de concepção do trabalho educacional desenvolvido na Rede, que foi aprofundada em 1978 com a publicação da Lei nº 6.545, no governo de Ernesto Geisel, instituindo os Centros Federais de Educação Tecnológica na Rede (CEFET), decorrentes da transformação das Escolas Técnicas Federais de Minas Gerais, do Paraná e Celso Suckow da Fonseca, para oferecer Educação Tecnológica, mediante os seguintes objetivos: a) ministrar cursos de nível superior: graduação e pós-graduação *lato* e *stricto sensu*, e licenciatura; b) ministrar cursos técnicos, em nível de 2º grau; c) ministrar curso de educação continuada; e d) realizar pesquisa aplicada. Essa nova institucionalidade foi aprofundada no governo de Itamar Franco, mediante a publicação da Lei nº 8.948/1994, que instituiu o Sistema e o Conselho Nacional de Educação Tecnológica e ainda transformou todas as Escolas Técnicas Federais em CEFET, permitindo inclusive que as Escolas Agrotécnicas Federais também adquirissem essa condição.

Gama (2004) pesquisando a "Reestruturação produtiva e reforma da educação profissional", modela essa educação com vista a outros interesses e desconexo com as necessidades da sociedade brasileira, e ainda do próprio Estado, em face dela ser atrelada aos detentores do capital, para saciar suas próprias necessidades. O autor marca a "perda da equivalência entre o ensino e o ensino técnico", mediante a edição da Portaria no 646/1997, cujo processo havia "iniciado através de um longo processo com a Reforma Capanema e a promulgação das leis Orgânicas na década de 40 durante o Estado Novo e que se consolidaria com a Lei nº 1.821/1953 (Lei da Equivalência)", em sua compreensão "para finalmente se generalizar na década de 60 com a promulgação da primeira LDB, a Lei nº 4.024/1961, que integrou as escolas profissionalizantes ao sistema regular" (2004, p.13).

Na nossa avaliação, a Rede e, consequentemente, o trabalho desenvolvido pelos professores, a partir da edição da Lei nº 8.948/1994, desdobram-se num outro direcionamento e perspectiva que seriam completamente irreversíveis. Para fundamentar esse entendimento, citamos a transformação do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná em Universidade Tecnológica do Paraná (UTFPR), decorrida da publicação da Lei nº 11.184/2005, pelo Presidente Luiz Inácio Lula da Silva, que, em tese, manteve os mesmos objetivos já definidos pela Lei nº 6.545/1978.

Destacamos que essa tendência de evoluir os CEFET à condição de Universidade Tecnológica Federal foi reprimida no governo de Luiz Inácio Lula da Silva, mediante a publicação da Lei nº 11.892/2008, que instituiu a Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica e criou os Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia (IFET), ou seja, induziu que Escolas Técnicas Federais, Escolas Técnicas vinculadas às Universidades Federais, Escolas Agrotécnicas Federais e Centros Federais de Educação Tecnológica, a reunirem-se, ou não, em prol dessa nova institucionalidade. Assim, o governo Lula, além de inibir as comunidades cefetianas de verticalizarem de forma indissociável e singular as universais atividades de ensino, pesquisa e extensão com vista ao seu desenvolvimento, instituiu uma nova Rede a ser estruturada pelos IFET, pela UTFPR e pelas autarquias que optaram por não se transformar em IFET; todavia, em nossa visão, manteve o compromisso com a Educação Tecnológica, já anteriormente definida pela Lei nº 6.545/1978, ou seja, atrelada aos detentores do

capital e aquém do desenvolvimento pleno da sociabilidade dos Seres da sociedade brasileira.

Tudo isso seria necessidade ou preciosismo político-partidário do tipo "o nosso governo tem que deixar a sua marca"?

2. ESTRUTURA CURRICULAR DOS CTS

Inicialmente, destacamos, mediante inspeção no Parecer CNE/CEB nº 16/1999, que os conselheiros do CNE (p.275) compreendem que "a educação para o trabalho não tem sido tradicionalmente colocada na pauta da sociedade brasileira como universal", e que "o não entendimento da abrangência da educação profissional na ótica do direito à educação e ao trabalho, associando-a unicamente à 'formação de mão de obra', tem reproduzido o dualismo existente na sociedade brasileira entre as 'elites condutoras' e a maioria da população", na sua interpretação, configurando uma situação de "considerar o ensino normal e a educação superior como não tendo nenhuma relação com educação profissional". Pelo exposto e considerando que o CNE se caracteriza por ser um órgão de normatização da educação brasileira, desponta a contradição desse órgão.

Os conselheiros do CNE, ainda nesse Parecer/1999 (p.275), comunicam que "a formação profissional, desde as suas origens, sempre foi reservada às classes menos favorecidas, estabelecendo-se uma nítida distinção entre aqueles que detinham o saber (ensino secundário, normal e superior) e os que executavam tarefas manuais (ensino profissional)", em face de que "ao trabalho, frequentemente associado ao esforço manual e físico, acabou se agregando ainda a ideia de sofrimento". A esse contexto explicitado no Parecer CNE/CEB nº 16/1999, Neves e Pronko (2008, p.24) interpretam que "a escola dividida em níveis e modalidades é inerente à hierarquização que se estabelece na produção efetivamente capitalista de mercadorias, de natureza flexível, baseada na variação do trabalho e na própria especificidade da produção da vida em formação sociais que se ocidentalizam".

As autoras interpretam que esses desdobramentos históricos da educação brasileira ainda são decorrentes da "generalização do emprego diretamente produtivo da ciência, sob a direção do capital", induzindo "a educação escolar a organização de dois ramos de ensino na formação para o trabalho complexo: o ramo científico e o ramo tecnológico" (2008, p.28). Quanto a esses ramos, Neves e Pronko (2008, p.28) comunicam que "o ramo científico, herdeiro da tradição humanista, propiciou uma formação de base científico-filosófica, mediatamente (e não imediatamente) interessada na utilização produtiva de seus pressupostos", em face de conferir, "historicamente, aos seus 'beneficiários' um passaporte para as funções de direção da sociedade". No que tange ao ramo tecnológico, as autoras argumentam que esse "caracterizou-se por uma relação mais estreita entre educação e produção de bens e serviços, fornecendo os princípios científico-tecnológicos da técnica de forma mais imediatamente interessada na sua utilização produtiva e formando, principalmente, especialistas e dirigentes no âmbito da produção" (2008, p.28).

Essas considerações apresentadas são estratégicas para compreendermos a gênese dos CST, considerando a manifestação dos conselheiros do CNE. Julgamos ainda ser pertinente destacar a manifestação de Neves e Pronko (2008, p.28) a respeito da "escolarização tecnológica", que, em sua compreensão, "não deve ser confundida com as atividades de formação técnico-profissional que visam ao desenvolvimento de habilidades específicas voltadas para sua aplicação direta na produção de bens e, mais contemporaneamente, de serviços, ou seja, para o treinamento dos trabalhadores". As autoras ainda comunicam que, considerando os desdobramentos, "a educação científica foi progressivamente se configurando de forma mais pragmática, mais atrelada à produção social da existência, enquanto a educação tecnológica foi se afastando cada vez mais do sentido unitário e integrado preconizado por Marx e Gramsci" (2008, p.28).

Os conselheiros da Câmara de Educação Superior (CES) do CNE, todavia, comunicam, mediante o Parecer CNE/CES nº 436/2001, que "até a década de 80, a formação profissional limitava-se ao treinamento para a produção em série e padronizada" e que em função das "novas formas de organização e gestão modificaram estruturalmente o mundo do trabalho", e ainda, em função disto, "um novo cenário econômico e produtivo se estabeleceu com o desenvolvimento e emprego de tecnologias complexas agregadas à produção e à prestação de serviços e pela crescente internacionalização das relações econômicas". A contradição, portanto, permanece, ou seja, os conselheiros do CNE veem a educação profissional como algo voltado exclusivamente aos arranjos produtivos e esses ainda nesse mesmo Parecer justificam que "passou-se, assim, a requerer sólida base de educação geral para todos os trabalhadores, educação profissional básica, qualificação profissional de técnicos e educação continuada para atualização, aperfeiçoamento, especialização e requalificação" (2001, p.310). Mas, somente para alguns trabalhadores, para os outros não.

Seria a educação para os filhos 'dos outros'?

Verificamos no Parecer CNE/CES nº 436/2001 (p.310) a falsidade ideológica desses conselheiros ao justificarem esse entendimento mediante a argumentação de que "a educação profissional passou, então a ser concebida não mais como simples instrumento de política assistencialista ou linear ajustamento às demandas do mercado de trabalho, mas, sim", em sua visão, "como importante estratégia para que os cidadãos tenham acesso às conquistas científicas e tecnológicas da sociedade". A nossa interpretação solidifica-se nesse mesmo Parecer (2001, p.317), quando os conselheiros comunicam que "os cursos superiores de tecnologia, ainda que com outra nomenclatura, têm sua origem nos anos 60", ou seja, "nasceram apoiados em necessidades do mercado e respaldados pela Lei nº 4.024/1961 e por legislação subsequente". Comunicam ainda, no Parecer CNE/CES nº 436/2001 (p.317) que "em 1979, o MEC mudou sua política de estímulo à criação de cursos de formação de tecnólogos nas instituições públicas federais, cursos estes que deviam primar pela sintonia com o mercado e o desenvolvimento tecnológico".

Assim, compreendem que, mediante o Parecer CNE/CES nº 436 (p.318), o tecnólogo "deve estar apto a desenvolver, de forma plena e inovadora atividades em uma determinada área profissional e deve ter formação específica para", em sua visão: a) aplicação, desenvolvimento, pesquisa aplicada e inovação tecnológica; b) gestão de processos de produção de bens e serviços; e c) o desenvolvimento da capacidade empreendedora. Observamos que a terminologia utilizada pelos conselheiros do CNE está em plena concordância inclusiva com o mundo da produção e destoante com a construção da sociabilidade do Ser social, em face de sua polarização e exclusão natural com respeito a esse mundo.

Constatamos que, ao mesmo tempo em que os conselheiros do CNE enaltecem essa nova visão sobre a formação dos tecnólogos, rebaixam esses no Parecer CNE/CES nº 436/2001 (p.319), mediante estrutura modular, com duração variável e "rapidez no atendimento às mutações das necessidades do mercado e às possibilidades de verticalização, aprofundamento em áreas profissionais específicas, sintonizadas com o mundo do trabalho", tudo isso, em sua compreensão, para atender aos interesses da "juventude em dispor de credencial para o mercado de trabalho, podendo conferir a estes cursos uma grande atratividade, tornando-se um potencial de sucesso". Interpretam que os CST terão uma duração mais reduzida do que os cursos de graduação, assim caracterizando uma situação estranha, em face de que os tecnólogos estão, do ponto de vista da formação, acima dos técnicos (profissionais de nível médio) e abaixo dos bacharéis (profissionais de nível superior), porém são considerados concluintes de cursos de graduação, reafirmando a contradição dos conselheiros do CNE.

Ao mesmo tempo, validam a visão da Secretaria de Educação Média e Tecnológica (SEMTEC), hoje Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica (SETEC), vinculada ao MEC, sobre as áreas profissionais relativas aos CST, sua duração mínima e seu respectivo perfil, informado e identificado no Anexo A do Parecer CNE/CES nº 436/2001 (p.326-333). Verificamos que a potencialidade definida para os CST pelos conselheiros do CNE é contraditória com o que a SEMTEC/MEC havia estipulado em termos de carga horária mínima para esses cursos (Aviso Ministerial no 120/2000), mesmo considerando que essas poderiam ter um acréscimo de 50%, em face da sua abrangência e envergadura. Outra questão apontada por nós é que somente em 2002 os conselheiros do CNE definiram as diretrizes curriculares para esses cursos, ou seja, primeiro a estrutura administrativa do MEC definiu a potencialidade profissional do tecnólogo e a carga horária dos CST, para somente depois normatizar sobre os referenciais norteadores desses cursos, caracterizando uma situação, além de invertida, desconexa porque um Parecer remete a outro, num contexto fragmentário.

Ainda sobre a questão da duração dos CST, os conselheiros do CNE, no âmbito do seu Conselho Pleno (CP), mediante o Parecer CNE/CP nº 29/2002 (p.347), comunicam que "o Parecer CFE nº 160/1970 já apresentava os cursos superiores de tecnologia com objetivos definidos e com características próprias, estabelecendo que os mesmos deveriam ter a duração que fosse necessária e que era imprópria a denominação de 'curta duração'". Esses conselheiros, ainda nesse mesmo Parecer (2002, p.347-348), revelam a conclusão a que chegaram os integrantes do Conselho Federal de Educação (CFE) no Sétimo Seminário de Assuntos Universitários, ocorrido em maio de 1974, sobre o currículo dos CST, comunicando que "'os cursos de graduação em tecnologia, conducentes ao diploma de tecnólogo, deverão ter currículo próprio, definido e terminal, porque correspondem às necessidades deixadas a descoberto pelos cursos tradicionais de graduação plena'". Essa questão foi definida pela SEMTEC/MEC mediante o Aviso Ministerial nº 120/2000, definindo carga horária e perfil, em consonância com a Resolução CONFEA nº 218/1973 e avalizada pelos conselheiros do CNE.

Compreendemos que os fatos históricos sobre os CST, destacados pelos conselheiros do CNE no

Parecer CNE/CP nº 29/2002, vão demonstrando o vínculo estreito que o MEC foi estabelecendo para os CST com relação a sua estrutura curricular e o correspondente atrelamento agudo ao mercado de trabalho, bem como as contradições desse conselho que se utiliza da retória para aderir a vontade pura do mercado. Nesse sentido obervamos que as diretrizes curriculares estabelecidas pelos conselheiros do CNE, no Parecer CNE/CP nº 29/2002, estão cunhadas em sintonia, como argumentam eles (2002, p.350), com a "Classificação Brasileiro de Ocupações (CBO) sob o código CBO nº 0.029.90, com a seguinte descrição: 'estudar, planejar, projetar, especificar e executar projetos específicos da área de atuação'" e ainda declaram que "essa versão da CBO foi recentemente substituída pela CBO/2002 que inclui o exercício profissional do tecnólogo, formado em curso superior de nível tecnológico", agora com atribuições, em nossa avaliação, ainda mais afuniladas, tais como, "planejar serviços e implementar atividades, administrar e gerenciar recursos, promover mudanças tecnológicas, aprimorar condições de segurança, qualidade, saúde e meio ambiente".

Nessa linha de argumentação e de vínculo estreito com o mercado de trabalho, digamos com vista à reprodução ampliada do capital, os conselheiros do CNE, ainda no Parecer CNE/CP nº 29/2002 (p.356-357), apresentam as seguintes diretrizes orientadoras à organização curricular dos CST de graduação: a) Desenvolver competências profissionais tecnológicas para a gestão de processos de produção de bens e serviços; b) Promover a capacidade de continuar aprendendo e de acompanhar as mudanças nas condições de trabalho, bem como propiciar o prosseguimento de estudos em cursos de pós-graduação; c) Cultivar o pensamento reflexivo, a autonomia intelectual, a capacidade empreendedora e a compreensão do processo tecnológico, em suas causas e efeitos, nas suas relações com o desenvolvimento do espírito científico; d) Incentivar a produção e a inovação científico-tecnológica, a criação artística e cultural e suas respectivas aplicações no mundo do trabalho; e) Adotar a flexibilidade, a interdisciplinaridade, a contextualização e a atualização permanente dos cursos e seus currículos; e f) Garantir a identidade do perfil profissional de conclusão de cursos e da respectiva organização curricular.

Para complementar o quadro de orientações com vista à organização curricular dos CST, os conselheiros do CNE, no Parecer CNE/CP nº 29/2002 (p.362-363), definem alguns referenciais "para caracterização de tecnólogos e a correspondente formação em determinada área", dentre as quais julgamos oportuno destacar:

- Densidade: a formação do tecnólogo é, obviamente, mais densa em tecnologia. Não significa que não deve ter conhecimento científico. O seu foco deve ser o da tecnologia, diretamente ligada à produção e gestão de bens e serviços. A formação do bacharel, por seu turno, é mais centrada na ciência, embora sem exclusão da tecnologia. Trata-se, de fato, de uma questão de densidade e de foco na organização do currículo.
- Tempo de formação: é muito difícil precisar a duração de um curso de formação de tecnólogo, objetivando fixar limites mínimos e máximos. De qualquer forma, há um relativo consenso de que o tecnólogo corresponde a uma demanda mais imediata a ser atendida, de forma ágil e constantemente atualizada.
- Perfil: o perfil profissional demandado e devidamente identificado constitui a matéria primordial do projeto pedagógico de um curso, indispensável para a caracterização do itinerário de profissionalização, da habilitação, das qualificações iniciais ou intermediárias do currículo e da duração e carga horária necessária para sua formação.

Analisando os dois pareceres, o Parecer CNE/CES nº 436/2001 e o Parecer CNE/CP nº 29/2002, verificamos que a postura dos conselheiros do CNE com respeito à organização curricular dos CST é de pleno atendimento ao mercado de trabalho, ou seja, essa oferta de curso está rigidamente, na visão e manifestação desses conselheiros, bem como do MEC, centrada no atendimento desse segmento. Essa nossa compreensão está devidamente explicitada no Parecer CNE/CP nº 29/2002 (p.381-382), quando os conselheiros do CNE comunicam que "os projetos pedagógicos dos cursos poderão ser estruturados em módulos, disciplinas, núcleos temáticos, projetos ou outras atividades educacionais, com base em competências a serem desenvolvidas, devendo os mesmos serem elaborados a partir das necessidades oriundas do mundo do trabalho".

A normatização dessa visão de "educação profissional e tecnológica" por parte do MEC, porque o CNE é autarquia vinculada a esse ministério e coparticipe de suas políticas de gabinete, aliada ao seu movimento na territorialidade munido de suas prerrogativas ministeriais, caracterizaria ou não como uma ação que se apropria de segmentos da sociedade sustentada na retórica educacional para tratar essa

educação ora como "mercadoria-educação", ora como "educação-mercadoria"?

3. A PROPOSTA DA CORRENTE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE (CTS)

Na premissa de situarmos o debate a respeito da corrente CTS para a educação, destacamos inicialmente que o movimento Ciência, Tecnologia e Sociedade[1] se configura ao mesmo tempo como um campo de estudo e investigação, com vista a, em nossa avaliação, compreender melhor a ciência e a tecnologia em seu contexto social e a correspondente interação entre as mesmas, e ainda, como interpreta Acevedo Diaz (2002), uma proposta educativa inovadora de caráter geral constituída de um novo planejamento radical do currículo, e em todos os níveis de aprendizagem. O autor se apoia na compreensão estabelecida por Waks (1996, *apud* ACEVEDO DIAZ, 2002) sobre "*Las relaciones escuela-comunidad y su influencia em la educación en valores en CTS*", para formular o entendimento de que a finalidade desta ação no currículo é a de "*dar una formación en conocimientos y, especialmente, en valores que favorezca la participación ciudadana responsable y democrática en la avaluación y el control de las implicaciones sociales de la ciência y la tecnologia*" (2002, p.1).

Quanto às origens do movimento CTS, Acevedo Diaz, Vázques Alonso e Manassero (2001, p.2) argumentam que essa apresenta fatores provenientes de direções diferentes e que, mesmo assim, o movimento tem a pretensão de compreender melhor "*la dimensión social y organizativa de la ciencia y la tecnologia*", destacando os seguintes aspectos: a) "*La necesidad de gestionar los grandes laboratorios industriales y militares y los centros de investigación y desarrollo (I+D), asociados a la gran ciencia (big science) y la alta tecnologia (high technology)*"; b) "*La emergencia de una conciencia crítica respecto a los efectos negativos de la ciencia y la tecnologia*"; c) "*La necesidad de crear instituciones y formar experts en política científico-tecnológica y evaluación de tecnologias*"; e d) "*La aparición de investigaciones, sobre todo desde la sociologia del conocimiento, que cuestionan la imagen tradicional de la ciencia y la tecnologia como actividades asiladas del contexto social, político y econômico*".

Ainda com relação ao movimento CTS, Cerezo (1998) declara que é possível identificar duas grandes tradições, sendo uma de origem européia e outra norte-americana. O autor argumenta que a tradição européia, "*que tiene como fuentes principales la sociologia clásica del conocimiento y una interpretación radical da obra de Thomas Kuhn*" (1998, p.4), centra-se tradicionalmente nos estudos dos antecedentes sociais da ciência e configura-se como uma tradição de investigação acadêmica mais do que educativa, e ainda tem-se dedicado recentemente ao estudo da tecnologia como processo social, centrando-se na sociologia do conhecimento científico. Quanto à tradição norte-americana, essa se tem centrado mais nas consequências sociais e ambientais causadas pelos produtos tecnológicos, sem, contudo, levar em conta os antecedentes sociais de tais produtos. No que se refere ao ponto de vista acadêmico, o marco de estudo relaciona-se a disciplinas da área de conhecimento das humanidades, como: filosofia, história, teoria política, *etc*., mediante ensino e reflexão política.

Podemos, portanto, abstrair do movimento CTS uma ação que se funda na deflagração de um processo educativo destinado a promover, como se constata em artigos publicizados sobre a temática, uma extensa "*alfabetización científica y tecnológica*" (*science and technology literacy*)[2], na premissa de universalizar a capacitação das pessoas em ciência e tecnologia, em face de argumentos como os de Acevedo Diaz, Vázques Alonso e Manassero:

> *Desde luego, el vertiginoso desarrollo de la ciência y la tecnologia está logrando resultados con un potencial extraordinário para transformar la natureza y satisfacer muchas necesidades humana; sin embargo, también está produciendo un creciente deterioro medioambiental, originando nuevos*

[1] Os estudos sociais da ciência e da tecnologia, ou estudos sobre CTS, constituem um campo de trabalho nos âmbitos da investigação acadêmica, da educação e das políticas públicas de todos os países onde atualmente já estão mais sedimentados. Estes estudos se originaram há pouco mais de três décadas, a partir de novas correntes de investigação filosofia e sociologia da ciência e de um incremento na sensibilidade social e institucional sobre a necessidade de uma regulamentação democrática das mudanças científico-tecnológicas. É importante, neste campo, entender os aspectos sociais do fenômeno científico-tecnológico, tanto no que diz respeito às suas condicionantes sociais como no que diz respeito às suas consequências sociais e ambientais. O enfoque geral é de caráter interdisciplinar, abrangendo disciplinas das ciências sociais e a investigação acadêmica em humanidades, como filosofia e história da ciência e da tecnologia, sociologia do conhecimento científico, teorias da educação e economia da mudança tecnológica. CTS define hoje um campo de trabalho bem consolidado institucionalmente em universidades, em centros educacionais e na administração pública de países mais industrializados. É nosso desejo fecundar tais abordagens em nível de Brasil, buscando adicionar a estes aspectos econômicos, sociais e políticos contextualizados para o nosso país. (BAZZO; VALE PEREIRA; LINSINGEN, 2008, p.146-147).

[2] Sobre a questão da "alfabetização científica e tecnológica (ACT)", Auler e Delizoicov (2001, p.2) argumentam que o "rótulo Alfabetização Científica e Tecnológica abarca um espectro bastante amplo de significados traduzidos através de expressões como popularização da ciência, divulgação científica, entendimento público da ciência e democratização da ciência", e ainda que "os objetivos balizadores são diversos e difusos", que na compreensão dos autores "vão desde a busca de uma autêntica participação da sociedade em problemáticas vinculadas à CT, até aqueles que colocam a ACT na perspectiva de referendar e buscar o apoio da sociedade para a atual dinâmica do desenvolvimento científico-tecnológico".

> *riesgos y planteando trascendentales interrogantes éticos y legales. Uno de los desafios actuales más importantes es conciliar la ciência y la tecnologia orientada hacia la innovación productiva con la preservación de la natureza y la satisfación de necesidades sociales. El mundo de hoy es un mundo de benefícios y amenazas globales, así como de profundas desigualdades en la distribución de la riqueza, los costes ambientales y la apropriación del conocimiento científico* (2002, p.2).

Linsingen (2004, p.9), analisando o enfoque CTS em nível universitário, argumenta que, em se tratando de estudantes de engenharia e ciências naturais, o objetivo é de uma formação humanística básica, que possibilite "desenvolver nos estudantes uma sensibilidade crítica acerca dos impactos sociais e ambientais derivados das novas tecnologias ou a implantação das já conhecidas", formando, assim, "por sua vez uma imagem realista da natureza social da ciência e da tecnologia, assim como do papel político dos especialistas na sociedade contemporânea". Por outro lado, na visão do autor, "trata-se de oferecer um conhecimento básico e contextualizado sobre ciência e tecnologia aos estudantes de humanidades e ciências sociais", de forma a proporcionar aos "futuros juízes e advogados, economistas e educadores, uma opinião crítica e informada sobre as políticas tecnológicas que os afetarão como profissionais e como cidadãos" (2004, p.9).

Este entendimento de Linsingen (2004, p.6) funda-se no fato de interpretar que na perspectiva CTS atual, a tecnologia tende a ser vista mais como forma de organização social, mediante interações complexas, incorporando aspectos que não são comuns à concepção tradicional de engenharia, o que sugere que as duas expressões historicizadas pelo autor, "filosofia da tecnologia" ou "filosofia da engenharia", podem ser utilizadas com enfoques diferentes no tratamento da questão tecnológica, mesmo considerando que "engenharia e tecnologia são coisas distintas, embora umbilicalmente ligadas".

Quanto à questão da "*alfabetización científica y tecnológica*", Acevedo Diaz (2002, p.1-2) interpreta essa como uma ação que pode estar voltada para diversos objetivos, como aqueles relacionados aos conhecimentos e até mesmo aos aspectos relativos a valores e normas, sendo que na sua visão, uma aprendizagem com orientação CTS pode destinar-se a atingir aos seguintes objetivos: a) "*Incrementar la comprensión de los conocimientos científicos y tecnológicos, así como sus relaciones y diferencias, con el propósito de atraer más alumnado hacia las actividades profesionales relacionadas con la ciencia e la tecnologia*"; b) "*Potenciar los valores propios de la ciencia y la tecnologia para poder entender mejor lo que estas pueden aportar a la sociedad, prestando también especial atención a los aspectos éticos necesarios para su uso más responsable*"; e c)

> *Desarrollar las capacidades de los estudiantes para hacer posible una mayor compresión de los impactos sociales de la ciencia y, sobro todo, de la tecnologia, permitiendo así su participación efectiva como cuidadanos em la sociedad civil. Este punto de vista es, sin duda, el que tiene mayor interes en una educación obligatoria y democrática para todas las personas* (2002, p.1-2).

Observa-se, pela exposição dos autores citados e ainda por outros textos pesquisados, que existe no movimento CTS uma preocupação significativa com relação aos problemas sociais decorrentes do desenvolvimento da ciência e da tecnologia, ou seja, trata-se de uma postura que permite ir muito mais além do simples trato acadêmico da ciência e da tecnologia, na premissa de oportunizar ao Ser uma formação que lhe possibilite vislumbrar seus compromissos e responsabilidades para essa mesma sociedade, tanto individual como coletiva, em face desses problemas afetarem a vida cotidiana, o presente e ainda prospectar o seu futuro. Verificamos, todavia, que no debate desenvolvido por autores que integram o movimento CTS, não está presente a problematização sobre a categoria sociedade e sua correspondente relação, interação, crítica e contradição com as duas outras categorias ciência e tecnologia, em face de que esse Ser que desenvolve a ciência e a tecnologia é o mesmo Ser que também se educa nesse movimento e interage com os outros Seres no desenvolvimento de uma sociedade que se caracteriza como um ambiente de disputa.

Entendemos ser necessário resgatar que a formação de tecnólogos, egressos da modalidade Educação Tecnológica, está centrada no aspecto puro da tecnologia e ainda utilitarista. Vislumbra-se, portanto, que a abordagem a partir da perspectiva CTS apresenta relação com as ações acadêmicas desenvolvidas na autarquia, e para melhor compreender esse movimento CTS, que tem como um de seus focos os estudantes, Acevedo Diaz, Vázques Alonso e Manassero (2001) argumentam que o sucesso ou fracasso do êxito da orientação CTS está na postura assumida pelo professor em sala de aula.

> *Gran parte de los êxitos, y también de los fracasos, de los estudiantes suelen estar relacionados con el clima que se genera en el*

> *aula. Los profesores que desean dar una orienatación CTS a su enseñanza no solo tienen que comunicar a sus alumnos los objetivos que se pretenden alcanzar, sino que han de esforzarse personalmente por lograrlos y predicar con el ejemplo. El profesorado deberá promover también la comunicación en el aula, una mayor actividad – que no "activismo" – por parte de los alumnos y hasta una cierta autonomia para ellos*. (ACEVEDO DIAZ, 2002, p.2).

Com relação à responsabilidade que é delegada aos professores, referida pelos autores (2001), Acevedo Diaz (2002, p.2-3) ainda se apoia nos diversos estudos de pesquisa sobre os professores que trabalham com uma perspectiva de ensino CTS, desenvolvido por Penick (1993), para propor algumas características que esses professores devem assumir ao colocarem em prática uma educação CTS de qualidade, como:

1. *Dedican tiempo suficiente a planificar los procesos de enseñanza-aprendizaje y la programación de aula, así como a la evaluación de la enseñanza practicada para mejorarla*.
2. *Son flexibles con el curriculum y la própria programación*.
3. *Proporcionan um "clima' afectivamente acogedor e intelectualmente estimulante, destinado a promover la interacción y la comunicación compresiva em el aula*.
4. *Tienen altas expectativas sobre si mismos y sus alumnos, siendo capaces de animar, apoyar y potenciar las iniciativas de estos*.
5. *Indagan activamente, mostrándose deseosos de aprender nuevas ideas, habilidades y acciones, incluyendo tanto las que provienen de la psicopedagogía como de la actualidad científica y tecnológica y del ámbito social. También son capaces de aprender com sus compañeros y com sus alumnos*.
6. *Provocan que surjan preguntas y temas de interés em el aula. Siempre piden fundamentos o pruebas que sostengan las ideas que se proponen*.
7. *Potencian la aplicación de los conocimientos al mundo real. Dan tiempo para discutir y evaluar estas aplicaciones*.
8. *Hacen que los alumnos vean la utilidad de la ciencia y la tecnologia y les dan confianza en su propia capacidad para utilizarlas com êxito. No ocultan, sin embargo, las limitaciones de éstas para resolver los complejos problemas sociales*.
9. *No contemplan las paredes del aula como uma frontera, ya que creen que el aprendizaje debe transcenderla. Llevan a clase personas y recursos diversos. Educan para la vida y para vivir*.

Evidencia-se, portanto, uma abordagem de ensino diferenciada da tradicional, a qual, segundo Acevedo Diaz, Vázques Alonso e Manassero (2002) é reconhecida por muitos professores, no que tange ao seu potencial motivador das interações CTS no ensino das ciências. Observamos ainda que a maioria dessas funções e recomendações não é exclusiva de uma orientação dirigida ao ensino de ciências, porém questões como a gestão ambiental do clima de sala de aula, tanto nos seus aspectos afetivo como metodológico, e a extensão de uma aprendizagem alargada, sem dúvida, são elementos que propiciam uma educação de qualidade, em face de compreender como se dão as relações entre ciência, tecnologia e sociedade, não apenas nos ambientes acadêmicos descolados de uma perspectiva do processo de hominização do Ser.

Com relação à questão da abordagem do ensino tradicional corrente, Bazzo, Vale Pereira e Linsingen (2008, p.65-66) argumentam que, segundo pesquisadores da área, "três são os elementos básicos que aparecem sobre o ato de conhecer: o sujeito que conhece (S), o objeto do conhecimento (O) e o conhecimento como produto (C)", e que relacionados a estes também "são três os modelos teóricos que mais corriqueiramente representam as relações entre estes três elementos básicos: empirismo, apriorismo e construtivismo". Assim, antes de adentrar na visão dos autores (2008), julga-se ser relevante destacar que estes estão falando da academia (universidade) tendo por pano de fundo a postura assumida por professores engenheiros frente a cursos de engenharia (bacharelado) e a relação com o movimento CTS. Destacamos ainda ser necessário, no presente caso, considerar que os CST da área industrial apresentam forte viés tecnológico e também são academicamente conduzidos por engenheiros que estão professores, não divergindo, portanto, tanto assim quanto ao *modus operandi* de lá quanto ao de cá.

Para aprofundarmos a questão destacada por Bazzo, Vale Pereira e Linsingen (2008), interpretada como reflexão pedagógica sobre o que se passa em sala de aula, ou seja, quando o professor se apropria de um determinado conhecimento e o transporta para a sala de aula, mediante uma prática pedagógica, os autores analisam três posturas que o professor poderia assumir em relação aos seus alunos, os quais se caracterizam como modelo epistemológico: 1. Empirista; 2. Apriorista; e 3. Construtivista. Os autores argumentam que antes de se pretender uma mudança de postura pedagógica dos professores por

outra visão epistemológica, que se traduziria em utopia, imagina-se "que uma conscientização delas seja importante para uma ação docente transformadora que é, senão subordinada, ao menos altamente influenciada por reflexões sobre questões como essa" (2008, p.73).

Acevedo Diaz, Vázques Alonso e Manassero (2002, p.11) comunicam que é preciso reconhecer que a ciência e a tecnologia estão carregadas de valores e, portanto, não neutras, ocorrendo assim a necessidade de uma aprendizagem que estabeleça a ciência e a tecnologia como atividades humanas, em face de elas afetarem todos os aspectos da vida, inclusive a questão central da preservação do meio-ambiente, enquanto "*fundamento de actitude éticas universales que combina en la educación científica dos elementos curriculares básicos: conocimientos de ciencia y tecnologia y actitudes éticas*". A visão dos autores é de que o movimento CTS contribui para uma educação de atitudes éticas em relação à ciência e à tecnologia e para uma compreensão sobre essas que leve a uma preparação da cidadania do aluno para a tomada de decisão. Já Cerezo (1998, p.5) conclui que essa visão de inspiração CTS é, "*por un lado, la contextualización (desmitificación) de la ciencia y tecnologia, y, por otro, la promoción de la participación pública en contra de los estilos tecnocráticos de ordenamiento institucional*".

Essa visão sobre como se desenvolve o movimento CTS em relação a sua natureza está devidamente refletida no entendimento de Acevedo Diaz, como:

> *el enfoque para la tecnologia está destinado preferentemente a formar técnicamente trabajadores para la industria tecnológica. Su principal problema es que puede reforzar la visión determinista del desarrollo tecnológico porque se centra solo en las cuestiones puramente técnicas, tales como los productos y los procesos tecnológicos* (2001, p.4).

O entendimento dos autores arrolados, quanto às questões relativas à ciência e tecnologia, é de mudança, travessia, ou seja, é preciso uma ação diferenciada dos professores com relação ao currículo e também com relação às metodologias e atitudes, e ainda que integre a cultura humanística, a científica e a tecnológica numa perspectiva crítica e de independência intelectual, e que esteja, além de tudo, a serviço da sociedade. É importante considerar que uma perspectiva educacional centrada na tecnologia também está a serviço da sociedade, quando se considera os benefícios que ela traz para essa mesma sociedade, os quais aí estão e não se pode desconsiderá-los. Há de se fazer, todavia, uma avaliação isenta de sentimentos sobre a relação custo *versus* benefício, e é aí que, talvez, os autores que pesquisam e escrevem sobre CTS entram no contexto para propor uma nova forma de tratar ciência e tecnologia a partir do ambiente de sala de aula, o qual, mesmo se constituindo em uma das determinações sociais, não é hegemônico.

A questão do currículo, todavia, surge no movimento CTS enquanto uma linha de ação central de intervenção no currículo tradicional dos cursos, denominado de CTS como "*añadido curricular*", visando uma complementação. Cerezo (1998, p.6) entende que uma primeira opção poderia acontecer mediante uma matéria de CTS pura que introduzisse o estudante nos "*problemas sociales, ambientales, éticos, culturales, etc., causados pela ciência e tecnologia, como ocorre na Espanha*". O autor (1998, p.6) ainda esclarece que, neste caso, em uma matéria comum para os estudantes de diversas especialidades, tende a predominar conteúdos não técnicos, enfatizando-se "*los aspectos filosóficos, históricos, sociológicos, etc., de las relaciones ciencia-sociedad*". Quanto ao material docente para esta modalidade de educação CTS, Cerezo (1998) informa que os professores de humanidades e ciências sociais poderão adotar a forma clássica de manual, como ocorre até agora na Espanha ou mediante uma estrutura modular a partir de diversas unidades curtas de CTS, que é o caso clássico das unidades britânicas "SISCON (*Science in Social Context* – Ciência em Contexto Social) *in Scools*", desenvolvidas para o nível universitário.

Cerezo ainda informa que estas unidades abordam temas clássicos relacionados com a interação ciência, tecnologia e sociedade, como, por exemplo: a) a imagem pública da ciência; b) a bomba atômica; c) os problemas da superpopulação; d) a destruição dos recursos não renováveis; e) a neutralidade da ciência; f) a revolução copernica; e outros temas com o objetivo de transmitir aos estudantes uma consciência crítica sobre ciência e tecnologia. Como uma segunda possibilidade aventada pelo autor (1998), ainda dentro dessa mesma linha de ação, denomina-se CTS como "*añadido de matérias*", esta se daria mediante uma ação transversal no currículo, de forma a completar os temas tradicionais do ensino de ciências, mediante a inclusão de conteúdos CTS, adotado pela educação média espanhola. O problema levantado por Cerezo (1998) é que haveria uma tendência de predomínio pelos conteúdos técnicos e, portanto, haveria uma polarização das atividades nos professores de ciências.

Com relação ao balanço custo *versus* benefício dessa ação junto aos currículos acadêmicos, Cerezo faz o seguinte destaque:

> *Su ventaja más llamativa es que hace más interesantes los temas puramente científicos y, por ello, proporciona un estímulo importante para el estudio de la ciencia y la formación de vocaciones. Otra ventaja es que el cambio curricular no es costoso, aunque sí menos sencillo que en la opción anterior. Además, dado que tienden a excluirse contenidos CTS de la tradición europea y a que suelen predominar los contenidos técnicos, no requiere una capacitación CTS especial por parte del profesorado. El riesgo obvio, dado lo anterior, es la omisión de los contenidos específicos CTS o la conversión de estos en un añadido decorativo* (1998, p.7).

Para finalizar, o autor (1998) apresenta uma terceira possibilidade de intervenção, denominado de "*Ciencia y Tecnologia a través de CTS*", compreendida como uma opção mais influente, cuja premissa é a de reconstruir os conteúdos do ensino de ciências mediante uma visão CTS, porém centrada ainda nos professores de ciências, a qual pode ocorrer por matérias isoladas ou por meio de cursos científicos pluridisciplinares, numa fusão entre os conteúdos técnicos e CTS de acordo com os problemas sociais aventados. Para visualizar como se dá este formato, Cerezo faz o seguinte destaque:

> *El formato estándar de presentación de contenidos en esta opción es, en primer lugar, tomar un problema importante relacionado con los roles futuros del estudiante (ciudadano, profesional, consumidor, etc.) y, en segundo lugar, sobre dicha base se selecciona y estructura el conocimiento científico-tecnológico necesario para que el estudiante pueda entender un artefacto, tomar una decisión o entender un problema social relacionado con la ciencia-tecnología* (1998, p.8).

Cerezo (1998, p.8), em seu artigo, apresenta essas três modalidades gerais de implantação da educação CTS no ensino secundário, contendo diferentes tipos de materiais docentes, distintas necessidades de formação dos professores e, em geral, diferentes vantagens e inconvenientes, e ainda considera que "*en sus modalidades de implantación más globales, supondría poner el currículo patas arriba, transgrediendo la docência compartimentalizada mediante las tradicionales fronteras disciplinares*", entretanto, tal atitude "*requeriría un considerable esfuerzo en reciclaje del profesorado, reformas en la planificación didáctica, etc*". Esse contexto é interpretado pelos autores como um campo de trabalho onde se busca compreender o fenômeno científico-tecnológico em contexto social, nas palavras do autor, "*tanto en relación con sus condicionantes sociales como en lo que atañe a sus consecuencias sociales y ambientales"* (1998, p.1). Quanto a sua origem, Cerezo (1998, p.1) esclarece que "*CTS se origina hace tres décadas a partir de nuevas corrientes de investigación empírica en filosofia y sociologia, y de un incremento en la sensibilidad social e institucional sobre la necesidad de una regulación pública del cambio científico-tecnológico*".

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Destacamos que os CST, pelo exposto, são originários de um movimento de governos federais de várias matizes, com vista a disponibilizar egressos de uma visão de educação profissional concebida e normatizada pelos conselheiros do CNE, ao atendimento dos arranjos produtivos brasileiros, que no transcorrer da temporalidade tiveram que incorporar, mediante temporalidades e velocidades diferenciadas, a ciência e a tecnologia aos seus processos, em face de manter acessa a chama da inovação e competitividade, ou seja, da pura sobrevivência mercadológica porque o capitalismo é por natureza predatório. É nessa interação de variáveis que os CST, compreendidos pelos conselheiros do CNE como cursos superiores, porém num patamar inferior aos cursos de bacharelado e superior aos cursos técnicos de nível médio, são genericamente estruturados e em estreita sintonia com a visão do CONFEA, conforme manifestação já externalizada pelos conselheiros.

Com relação ao processo histórico dos CST, resgatamos que esses são decorrentes dos cursos de Engenharia Operacional, instituídos e negados pelo mesmo CNE, numa visão de curso superior de curta duração, também focado, cuja proposta foi refutada pelo MEC porque não conseguiu atender às necessidades da produção e ainda porque criou um inconveniente social, em face de que os egressos desses cursos, assim como dos cursos bacharelado de engenharia, eram denominados como engenheiros. Assim sendo, a gênese dos CST, em nossa avaliação, decorre dos cursos de engenharia operacional abandonados pelo MEC, porém numa outra versão, fundada na retórica e com a mesma idealização plastificada sob outra terminologia, e que não avança, considerando os contornos do processo educacional contemporâneo.

Essa compreensão traduz-se no movimento interno de segmentos do MEC (2008, p.11), ao atacarem as matrizes curriculares dos cursos de formação profissional e tecnológica, de nível superior, como "calcadas no modelo behaviorista e funcionalista", e, portanto, argumentam sobre a necessidade "de melhor fundamentar o aporte teórico da elaboração de uma proposta curricular que não reduza a formação à mera instrumentação

para o exercício profissional e que não defina *a priori* a forma de agir e de se comportar a que todos devem estar submetidos", em sua visão "para garantirem a empregabilidade necessária à disputa em algum posto no mercado de trabalho". Nesse debate sobre a matriz curricular dos CST, o MEC (2008, p.11) ainda conclui que "tal concepção curricular não apenas limita o trabalhador e não o forma como cidadão pleno, mas também não contempla a formação demandada pela atual organização do trabalho".

Para imbricar entendimentos quanto à possibilidade da perspectiva CTS superar essa visão "behaviorista e funcionalista" dos CST, destacamos o entendimento de Acevedo Diaz (1996, p.2) a respeito dos significados para CTS, como que "*en primer lugar CTS es un campo académico de estudio e investigación para una mejor compresión de la ciencia y la tecnologia en su contexto social*". O autor ainda interpreta que "*en otro sentido amplio CTS es una propuesta educativa innovadora de carater general que proporciona a las recientes propuestas alfabetizadoras de ciencia y tecnología (Science and Technology for All, STA) para todas las personas*", mediante uma determinada visão

> centrada en la formación de actitudes, valores y normas de comportamiento respecto a la intervención de la ciencia y la tecnología en la sociedad – y viceversa – con el fin de ejercer responsablemente como ciudadanos y tomar decisiones democráticas y razonadas en la sociedad civil (1996, p.2).

Com relação a essa proposta de alfabetização de ciência e tecnologia, Acevedo Diaz (1996, p.2), argumenta que "l*a educación CTS no puede limitarse a cursos específicos, sino que deberá impregnar transversalmente diversas áreas de conocimientos como las de Ciencias de la Naturaleza y de Tecnología de la ESO*", bem como, ainda em sua compreensão, "*a las matérias optativas de esta etapa ligadas a las áreas anteriores e a las asignaturas científicas y tecnológicas de las nuevas modalidades de Bachillerato*". A concepção da matriz curricular dos CST, todavia, funda-se numa concepção na qual os professores, que têm uma formação estritamente disciplinar, trabalhem nichos específicos de tecnologias e pouco ou quase nada a respeito da tecnologia e seus desdobramentos, considerando a sua gênese, ou seja, existe um afunilamento acintoso de uma formação e visão afunilada, decorrente de uma época de formação acadêmica que, nos cursos da área tecnológica, estão voltados a dar resposta ao mercado.

Sob essa perspectiva, compreendemos que os constructos teóricos epistemológicos CTS não possibilitam a superação desse modelo de educação profissional utilitarista, em face de que, em nossa compreensão, a ação deve se dirigir para outra perspectiva que não seja entendida como uma possível correção de rota, mas sim como ação em sua origem. Interpretamos ainda que, em termos de Brasil, é preciso definir a concepção de educação que dará sustentação ao desenvolvimento da sociedade brasileira e não uma concepção aportada em outras culturas aquém da realidade do Estado, mesmo porque, em nossa compreensão, a educação, assim como ciência e tecnologia, constitui elementos que configuram um contexto de partida e não de chegada.

Para transpor minimamente a presente organização pedagógica da educação profissional dos tecnólogos, propomos algumas ações que indiciam a concepção de educação politécnica, denominadas em Pérez (2004, p.9-10) de precisões pedagógicas, tais como:

- Recuperar a compreensão dos princípios científicos e tecnológicos dos processos de trabalho, de forma a possibilitar que o educando adquira um saber-fazer tecnológico que convirja para um trabalho criativo, em que predomine o componente intelectual.
- Trabalhar valores e atitudes não apenas relacionados com o trabalho e com a produção, mas com o mundo em sua totalidade, com o que se torna ainda mais decisivo o pensar crítico, a compreensão do contexto e os condicionantes sociais, econômicos e políticos.

Finalmente, propomos ao CNE, ao MEC, ao MCT, ao Estado como um todo e às instituições educacionais que atuam a educação tecnológica, a pronta inserção dos conceitos de politecnia e de omnilateralidade de forma articulada, visando a formação densa e ampliada e que se ponha para além dos critérios do mercado sob a sociabilidade do capital. Ademais, consideramos que os princípios de flexibilidade e de interdisciplinaridade, tidos como um grande avanço no movimento educacional pelos ideólogos do capital e pelo Estado brasileiro, sequer atendem à busca de superação das contradições postas no movimento societário do próprio capital.

REFERÊNCIAS

ACEVEDO DIAZ, José Antonio. **La formación del profesorado de enseñanza secundaria para la educación CTS. Uma cuestión problemática**. 1996. Disponível em: <http://www.oei.es/salactsi/acevedo9.htm>. Acesso em: jun. 2010.

_____. **Educación Tecnológica desde uma perspectiva CTS. Uma breve revisón del tema**. 2001. Disponível em: <http://www.oei.es/salactsi/acevedo5.htm>. Acesso em: agosto 2008.

_____. **Cambiando la práctica docente em la enseñanza de las ciências a través de CTS**. 2002. Disponível em: <http://www.oei.es/salactsi/acevedo2.htm>. Acesso em: abr. 2008.

ACEVEDO DIAZ, José Antonio; VÁSQUEZ ALONSO, Ángel; MANASSERO, María Antonia. **El Movimiento Ciencia-Tecnología-Sociedad y la Enseñanza de las Ciencias**. 2002. Disponível em: <http://www.oei.es/salactsi/acevedo13.htm>. Acesso em: setembro 2008.

AULER, Décio; DELIZOICOV, Demétrio. **Alfabetização científico-tecnológica para quê? Ensaio** – Pesquisa em Educação em Ciências, vol. 03, no 1, Jun., 2001. Disponível em: <http://www.fae.ufmg.br/ensaio/v3_n2/deciodemetrio.PDF>. Acesso em: jun. 2010.

BAZZO, Walter Antonio; VALE PEREIRA, Luiz Teixeira do; LINSINGEN, Irlan von. **Educação Tecnológica: enfoques para o ensino de engenharia**. 2a ed. ver. e ampl. Florianópolis: Ed. UFSC, 2008. 231p.

BRASIL. **Casa Civil. Constituição dos Estados Unidos do Brasil de 10 de novembro de 1937**. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Constituicao/Constituiçao37.htm>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica. **Legislação Básica** – Rede Federal. Parecer CNE/CEB no 16/1999. Trata das Diretrizes Curriculares Nacionais para a Educação Profissional de Nível Técnico, p. 274-309. 7a ed. Brasília: Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2008. 469 p.

_____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica. **Legislação Básica** – Rede Federal. Parecer CNE/CES nº 436/2001. Trata de Cursos Superiores de Tecnologia – Formação de Tecnólogos, p. 310-333. 7a ed. Brasília: Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2008. 469 p.

_____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica. **Legislação Básica** – Rede Federal. Parecer CNE/CP nº 29/2002. Trata das Diretrizes Curriculares Nacionais no Nível de Tecnólogo, p. 334-391. 7a ed. Brasília: Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2008. 469 p.

_____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica. **Princípios norteadores das engenharias nos institutos federais**. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Profissional Tecnológica, 2008. 36p.

_____. Senado Federal. **Decreto nº 7.566**, de 23 de setembro de 1909. Cria nas capitais dos Estados da Republica Escolas de Aprendizes Artífices, para o ensino profissional primário e gratuito. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=57829>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Decreto nº 47.038**, de 16 de outubro de 1959. Aprova o Regulamento do Ensino Industrial. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=177755>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Decreto-Lei nº 4.073**, de 30 de janeiro de 1942. Lei orgânica do ensino industrial. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=38152>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Decreto-Lei nº 4.127**, de 25 de fevereiro de 1942. Estabelece as bases de organização da rede federal de estabelecimentos de ensino industrial. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=30374>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Decreto-Lei nº 8.680**, de 15 de janeiro de 1946. Dá nova redação a dispositivos do Decreto-lei nº 4.073, de 30 de janeiro de 1942, (Lei Orgânica do Ensino Industrial). Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=104090>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Lei nº 378**, de 13 de janeiro de 1937. Dá nova, organização ao Ministério da Educação e Saúde Publica. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=102716>. Acesso: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Lei nº 6.545**, de 30 de junho de 1978. Dispõe sobre a transformação das Escolas Técnicas Federais de Minas Gerais, do Paraná e Celso Suckow da Fonseca em Centros Federais de Educação Tecnológica e dá outras providências. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=124749>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Lei nº 8.948**, de 8 de dezembro de 1994. Dispõe sobre a instituição do Sistema Nacional de Educação Tecnológica e dá

outras providências. Disponível: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=140342>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Lei nº 9.131**, de 24 de novembro de 1995. Altera dispositivos da Lei nº 4.024, de 20 de dezembro de 1961, e dá outras providências. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=142301>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Lei nº 11.184**, de 7 de outubro de 2005. Dispõe sobre a transformação do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná em Universidade Tecnológica Federal do Paraná e dá outras providências. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=253203>. Acesso em: jun. 2010.

_____. Senado Federal. **Lei nº 11.892**, de 29 de dezembro de 2008. Institui a Rede Federal de Educação Profissional, Científica e Tecnológica, cria os Institutos Federais de Educação, Ciência e Tecnologia, e dá outras providências. Disponível em: <http://www6.senado.gov.br/legislacao/ListaPublicacoes.action?id=258249>. Acesso em: jun. 2010.

CEREZO, José Antonio López. **Ciencia, Tecnología y Sociedad: el estado de la cuestión em Europa y Etados Unidos**. Revista Iberoamericana de Educación, no 18, sep.-dic., 1998. Disponível em: <http://www.rieoei.org/oeivirt/rie18a02.htm>. Acesso em: ago. 2008.

GAMA, Carlos Alberto Machado. **Reestruturação produtiva e reforma da educação profissional** – o Decreto nº 2.208/1997: trajetória e posições no CEFET-Campos, 2004. 133 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade Federal Fluminense, 2004. Disponível em: <http://www.bdtd.ndc.uff.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=347>. Acesso em: jun. 2010.

GURGEL, Rita Diana de Freitas. **A trajetória da Escola de Aprendizes e Artífices de Natal**: república, trabalho e educação (1909-1942), 2007. 230 f. Tese (Doutorado em Educação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007. Disponível em: <http://bdtd.bczm.ufrn.br/tedesimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=1861>. Acesso em: abr. 2010.

LINSINGEN, Irlan von. **O enfoque CTS e a educação tecnológica: origens, razões e convergências curriculares**. 2004. Disponível em: <http://www.nept.ufsc.br>. Acesso em: ago. 2008.

NEVES, Lúcia Maria Wanderley; PRONKO, Marcela Alejandra. O **mercado do conhecimento e o conhecimento para o mercado: da formação para o trabalho complexo no Brasil contemporâneo**. Rio de Janeiro: EPSJV, 2008. 204p.

PEREIRA, Francisco. **(Im)Possibilidades da construção de uma educação emancipadora em cursos tecnológicos: uma abordagem a partir de dois cursos localizados em Goiânia e Anápolis**, 2008. 199 f. Dissertação (Mestrado em Educação) – Universidade Católica de Goiás, 2008.

PÉREZ, Samuel Ubaldo. **La educación politécnica vs educación polivalente: uma discusión pedagógica**. 2004. Disponível em: <http://www.fchst.unlpam.edu.ar/iciels/>. Acesso em: mai. 2008.

PORTAL MEC. **Portaria MEC nº 646**, de 14 de maio de 1997. Regulamenta a implantação do disposto nos artigos 39 a 42 da Lei Federal nº 9.394/96 e no Decreto Federal nº 2.208/97 e dá outras providências (trata da rede federal de educação tecnológica). Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/setec/arquivos/pdf/PMEC646_97.pdf>. Acesso em: jun. 2010.

_____. **Conselho Nacional de Educação. Atribuições**. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14303%3Acne-atribuicoes&catid=323%3Aorgaos-vinculados&Itemid=754>. Acesso em: jun. 2010.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

CONTROLADOR DE DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA COM INTERFACE ETHERNET

Cleidir Salvato da Silva[1], Muriel Bittencourt de Liz[2]

Resumo: O consumo de energia elétrica cresce simultaneamente ao desenvolvimento econômico e tecnológico global. O Brasil tem se destacado mundialmente pelo seu crescimento e demonstrado grande capacidade econômica, evidenciando suas características de um país com economia dinâmica. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estima o crescimento na procura de energia elétrica de 6,8% para 2010; esse cenário é fortemente favorecido pela taxa de crescimento do PIB e atuação do país diante da crise econômica mundial, ocorrida em outubro de 2008. Frente a essa demanda de energia, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) prevê em suas resoluções que as empresas distribuidoras exerçam cobranças por valores de demanda de energia. Logo, o foco deste trabalho será o controle e medição desses valores de consumo a fim de evitar penalidades contratuais pelo excedente do valor de demanda contratada. Os estudos e experimentos foram realizados no âmbito do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), no laboratório de TCC do Departamento Acadêmico de Eletrônica do Campus Florianópolis. A metodologia de pesquisa adotada foi de caráter quantitativo; os procedimentos experimentais foram executados via ensaios laboratoriais. A estrutura modular do protótipo permitiu a realização de testes simultâneos e a validação dos conceitos de medição e controle do consumo energético. Os procedimentos dos mesmos e verificação da interface Ethernet foram realizados em conjunto com o protótipo de medição, demonstrando inúmeras possibilidades de controle sobre as cargas e a obtenção de dados estatísticos em tempo real.

Palavras-chave: Sistemas eletrônicos. Medição da energia elétrica. Controle da energia elétrica.

***Abstract**: The consumption of electric power grows simultaneously to the global economic and technological development. Brazil has distinguished itself worldwide by its growth and has shown economic strength, evidencing characteristics of a country with a dynamic economy. The Energy Research Company (Empresa de Pesquisa Energética – EPE) has estimated growth in demand for electricity by 6.8% in 2010; this scenario is strongly influenced by the growth rate of GDP and performance of the country before the global economic crisis, which occurred in October 2008. Faced with this demand of energy, the regulatory agency provides in its resolutions that the electrical distribution companies charges for carrying values of energy demand. Soon, the focus of this work is the control and measurement of these values of consumption to avoid contractual penalties due to the excess of the value of contracted demand. The studies and experiments were conducted under the Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC),, in the TCC laboratory of the Electronics Academic Department of Campus Florianopolis. The adopted research methodology was of quantitative character and bibliographic and experimental procedures were explored via laboratory testing. The modular design of the prototype allowed the simultaneous testing and validation of concepts for energy consumption measurement and control. The procedures for testing and verifying the Ethernet interface were implemented together with the measurement prototype, showing a number of possibilities for control over the loads and the acquirement of real-time data statistics.*

***Keywords**: Electronic systems. Electrical energy measurement. Electric power control.*

[1] Acadêmico do DAELN do IF-SC, bolsista de iniciação cientifica do CNPQ <cleidirsalvato@gmail.com>.
[2] Professor do DAELN do IF-SC, chefe do departamento de eletrônica <muriel@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o Brasil passou por intenso desenvolvimento econômico e tecnológico, resultando no aumento do consumo e demanda por energia elétrica. A Empresa de Pesquisa Energética prospectou uma estimativa na ordem de 6,8% para o ano de 2010 (BRASIL, 2009).

O crescimento no consumo de energia elétrica somado à preocupação social e ambiental torna as medidas de controle e monitoramento alvos de pesquisa e experimentos. Há, portanto, uma crescente busca por inovações tecnológicas na área de qualidade e eficiência energética.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta o uso de estruturas tarifárias diferenciadas para grupos de consumidores segundo consumo e nível de tensão atendido, cuja ultrapassagem no valor contratado de demanda gera multas.

O valor oneroso dos equipamentos e da estrutura para a instalação do sistema de controle de demanda de energia elétrica evidencia um mercado pouco explorado no setor de controle de cargas e gerenciamento da demanda de energia elétrica para pequenos consumidores.

O problema de pesquisa deste trabalho consiste em desenvolver um equipamento de baixo custo que efetue medições de energia elétrica e realize o controle de potência consumida, executando medidas corretivas com o objetivo de reduzir a curva de carga.

A metodologia de pesquisa aplicada foi quantitativa, executando procedimentos experimentais em laboratório, com o objetivo exploratório e embasado nos conceitos técnicos bibliográficos. Realizaram-se o desenvolvimento e estudo no laboratório de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) do Departamento Acadêmico de Eletrônica, do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), durante o período de agosto de 2009 a julho de 2010, utilizando-se dos recursos disponíveis neste laboratório.

1.1. Justificativa

A resolução Nº. 456 da ANEEL permite às distribuidoras de energia elétrica efetuar cobranças distintas para a demanda de potência e consumo de energia conforme os períodos do ano, os horários de utilização e a estrutura tarifária, fator que demonstra o dinamismo do sistema de cobrança.

Mecanismos de gerenciamento e controle de demanda de energia proporcionam o uso racional desta. Entretanto, fazem-se necessárias alterações físicas na planta elétrica e o estudo do sistema elétrico e dos equipamentos instalados na empresa para sua implementação.

A carência de equipamentos eficientes com menor custo, que satisfaçam as exigências dos projetos técnicos empresariais visando ao aproveitamento da energia e redução de custos, somada à preocupação sócio-ambiental, justifica a necessidade de desenvolver um mecanismo que complete tais requisitos.

1.2. Definição do problema

A estrutura tarifária da ANEEL aplica-se a grupos identificados por classes e subclasses de consumo, conforme a Tabela 1, retirada dos Cadernos Temáticos ANEEL – Tarifas de fornecimento de energia elétrica.

TABELA 1 – Grupo de consumidores classe A.

Subgrupos	Tensão de fornecimento
A1	≥230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3-a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	Subterrâneo
B1 - Residencial	127 V a 220 V
B2 - Rural	127 V a 220 V

Fonte: BRASIL, 2005, adaptado.

Os consumidores do Grupo B (baixa tensão) têm tarifa monômia, isto é, deles é cobrada apenas a energia que consomem. Os consumidores do Grupo A têm uma tarifa binômia, e são cobrados de acordo com 02 (duas) componentes: demanda contratada e energia consumida. Nos casos de ultrapassagem uma terceira parcela é agregada ao valor total da demanda excedida. Esses consumidores podem ser enquadrados em uma de três alternativas tarifárias:

a) tarifação convencional;
b) tarifação horosazonal verde;
c) tarifação horosazonal azul (compulsória para aqueles atendidos em tensão igual ou superior a 69 kV).

Com o uso de um gerenciador de energia é possível monitorar o consumo e a demanda de maneira contínua, além de fornecer dados que permitam a análise do seu comportamento e a tomada de medidas corretivas. Dessa forma, as cargas podem ser controladas automaticamente, impedindo a ocorrência de multas e reduzindo o gasto de energia elétrica.

Entretanto, a aplicação do controlador de demanda necessita de investimento inicial com que muitas empresas de pequeno porte não podem arcar de imediato, pois apenas o equipamento de medição e controle de carga custa entre R$ 2.200,00 e

R$ 7.500,00 (pesquisa realizada no período entre 25/04/2010 e 05/05/2010 com empresas do ramo).

Sem o uso de um gerenciador de energia, o custo de produção tende a elevar-se devido multas, tributos e valores de demanda contratada de forma errada. Com a elevação do custo de produção, o valor do produto final tende a subir, tornando-se até mesmo inviável ou impraticável. Em consequência, para sua manutenção nesse mercado competitivo, algumas pequenas empresas talvez tenham até que realizar reduções na folha de pagamento com a finalidade de viabilizar sua permanência no mercado proveniente do alto custo com a energia.

Mediante o contexto apresentado, surge o problema de pesquisa deste trabalho: como e quais metodologias deverão ser utilizadas para desenvolver um equipamento de baixo custo que execute medições de energia elétrica e realize o controle de potência consumida com o valor de demanda contratada, permitindo medidas corretivas tendo como objetivo a redução da curva de carga e do consumo de energia elétrica, evitando multas que ocasionariam prejuízo para o contratante?

1.3. Objetivo geral

Este trabalho visa ao desenvolvimento de um protótipo eletrônico que realize medições de energia elétrica consumida e execute medidas de intervenção (desligamento de cargas) em setores de menor prioridade, a fim de que o consumo medido não ultrapasse o valor de demanda contratada. Além disso, objetiva a criação de módulos que possibilitem a interação com o usuário através de Interface Homem Máquina (IHM) e ambiente *web*.

1.4. Objetivos específicos

a) fazer protótipos das placas de medição e de comunicação;
b) medir tensão e corrente alternada e potência real consumida;
c) controlar demanda de energia elétrica com intervenções nas cargas de menor prioridade;
d) gerar e disponibilizar dados estatísticos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Energia

A etimologia da palavra tem origem no idioma grego, onde *ergos* (εργος) significa trabalho. Segundo Tooley (2007), energia é a capacidade de realizar trabalho, enquanto potência é a taxa na qual o trabalho é realizado. A energia também pode designar as reações de uma determinada condição de atividade física, por exemplo: térmica, elétrica, trabalho mecânico (movimento) e luz.

2.2. Eletricidade

A eletricidade pode ser entendida como o fenômeno resultante da interação das partículas que formam a matéria, em especial os elétrons.

O eletromagnetismo é o principal resultante destas interações como, por exemplo, o campo magnético gerado ao redor de um condutor percorrido por corrente elétrica. Desta forma é possível desenvolver e efetuar medições acerca das grandezas elétricas utilizando as leis do eletromagnetismo.

2.3. Instrumentos de medição

Torreira (1978) destaca que a medida elétrica é uma das técnicas modernas de grande valor. Com ela podem ser resolvidos problemas na pesquisa em geral e, principalmente, aqueles referentes ao controle, avaliação e processos industriais. Ele destaca dois problemas cujas soluções traduzem a finalidade da medição elétrica: o que medir e como medir.

Considerando o problema “o que medir” da energia elétrica, podem-se mensurar as seguintes grandezas:

a) corrente, medida em ampères (A);
b) tensão, medida em volts (V);
c) frequência, medida em hertz (Hz);
d) potência, medida em watts (W).

Com “o que medir” Torreira (1978, p. 75) diz que: “Os instrumentos dividem-se de acordo com a finalidade e quanto ao sistema de medição com o qual funcionam.” Empregam-se normalmente os seguintes mecanismos pra realizar a medição:

a) sistema bobina móvel;
b) sistema ferro móvel;
c) sistema de lâminas vibráteis;
d) sistema eletrodinâmico;
e) sistema de ímã móvel;
f) sistema fio aquecido;
g) sistema eletrostático;
h) sistema eletrônico digital.

2.4. Sistema elétrico

Leão (2009) esclarece que, no Brasil, a oferta da energia elétrica é realizada através da prestação de serviço público concedido para exploração às entidades privadas ou governamentais. As empresas que prestam serviço de energia elétrica o fazem por meio da concessão ou permissão concedidas pelo poder público.

O sistema atual de energia elétrica brasileiro consiste em grandes usinas de geração que transmitem energia através de sistemas de transmissão de alta tensão, que é então dispensada à

distribuição de média e baixa tensão, conforme Figura 1. Normalmente os sistemas de distribuição são gerenciados por monopólios empresariais, enquanto o setor de geração e de transmissão apresenta uma economia mista (CONCESSIONÁRIA SANTO ANTONIO ENERGIA, 2009).

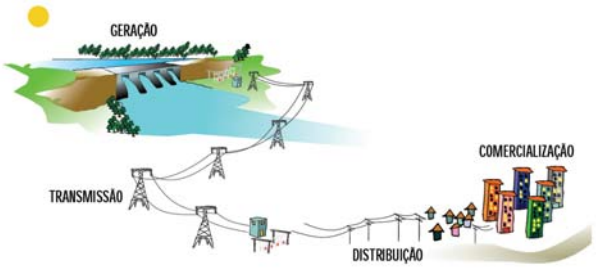


FIGURA 1 – Sistema elétrico.

Fonte: BRASIL, 2008, p.8.

2.5. Faturamento e tributos da energia elétrica

Entre as décadas de 70 e 90, havia uma única tarifa de energia elétrica em todo o Brasil, portanto, os consumidores de todos os estados pagavam o mesmo valor pela energia consumida. Após a série de privatizações no setor elétrico na década de 90, as tarifas de energia passaram a refletir as peculiaridades de cada região, como número de consumidores, quilômetros de rede e tamanho do mercado (quantidade de energia atendida por uma determinada infraestrutura), custo da energia comprada, tributos estaduais entre outros.

A empresa Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. (CELESC) atua no mercado de energia elétrica desde 1955, atendendo a distribuição e geração no estado de Santa Catarina.

As distribuidoras têm dois papéis importantes: a distribuição e a cobrança ao consumidor final. A distribuição é realizada através das componentes físicas da empresa (linhas de distribuição, transformadores, postes, subestações, etc.) e a cobrança é realizada através da conta de energia elétrica (ANEEL, 2000).

A tarifa representa, portanto, a soma de todos os componentes do processo industrial de geração, transporte (transmissão e distribuição) e comercialização de energia elétrica. São acrescidos ainda os encargos direcionados ao custeio da aplicação de políticas públicas. Os impostos e encargos estão relacionados na conta de energia (BRASIL, 2007).

O uso da estrutura tarifária é definida através da divisão em dois grupos:

a) Tarifa Monômia: constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa (Grupo B).
b) Tarifa Binômia: constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável (Grupo A).

A estrutura tarifária binômia está dividida em convencional e horossazonal, no que diz respeito aos componentes de energia e demanda, bem como a relatividade de preços nos diversos horários:

a) Tarifa convencional: aplicada aos consumidores atendidos com tensão inferior a 69 kV com demanda contratada inferior a 300 kW, independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.
b) Tarifa horossazonal: estão divididas em AZUL e VERDE. Tais tarifas têm preços diferenciados em relação às horas do dia (ponta e fora de ponta) e aos períodos do ano (úmido e seco).

Na Tabela 2, consta a tarifa executada pela CELESC para os devidos grupos de consumidores, os valores estão em Reais (R$). Nela é possível verificar que os consumidores do subgrupo B1 possuem um valor de tarifa mais elevado que os demais. Esta diferenciação é devida ao fato de que estes consumidores são classificados como tarifa monômia e já possuírem incorporada, no valor de consumo, a parcela de demanda.

TABELA 2 – Tarifa Convencional (sem tributos).

Subgrupo	Demanda (kW)	Consumo (kW/h)
A3a	R$ 16,50	R$ 0,17286
A4	R$ 24,85	R$ 0,17347
B1	-	R$ 0,29772
B2	-	R$ 0,17689

Fonte: CELESC, 2010, adaptado.

Na Tabela 3 visualizam-se os valores cobrados pelo valor de quilowatt de ultrapassagem dos valores de demanda contratada. Dois pontos nesta tabela são de extrema importância e vão ao encontro dos objetivos da pesquisa proposta neste trabalho: os valores cobrados em horário de ponta e fora dela; e a diferença de valores para o grupo de menor consumo (A4) e os grandes consumidores (A2).

2.6. Aspectos econômicos

Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007) destacam que, ao longo do século XX, o Brasil experimentou intenso desenvolvimento econômico, o que se refletiu numa crescente demanda de energia. Os fatores que determinaram tal crescimento foram: o expressivo processo de industrialização, uma grande expansão demográfica e o rápido aumento da taxa de urbanização. Entre 1970 e 2000 houve expressiva substituição de

fontes de energia menos eficientes (por exemplo: lenha) por outras mais eficientes (como os derivados do petróleo e a eletricidade); conforme observado na Figura 2.

TABELA 3 – Tarifa de ultrapassagem horosazonal Azul - Demanda (R$/kW).

Subgrupo	Ponta	Fora de Ponta
A2	R$ 53,46	R$ 7,38
A3	R$ 69,53	R$ 12,90
A3a	R$ 72,53	R$ 16,41
A4	R$ 96,37	R$ 24, 30

Fonte: CELESC, 2010, adaptado.

Segundo Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007), as fontes renováveis são responsáveis por 45% na oferta energética em 2005 (usinas hidrelétricas incluídas). Estima-se que em 2030 o consumo de energia elétrica no Brasil supere o patamar de 1.080 TWh, mantendo uma expansão média de 4% ao ano.

Nesse contexto, a disponibilidade de energia em quantidade e qualidade adequadas, com custos competitivos, é um dos mais importantes pré-requisitos para o desenvolvimento econômico de uma nação. Logo, a energia tem sido tratada mundialmente como um item de natureza estratégica. Eis a importância do desenvolvimento e estudos para o planejamento estratégico perante o panorama energético mundial.

2.7. Demanda de energia

A demanda pode ser definida como a quantidade de um determinado bem ou serviço que os consumidores desejam adquirir em determinado período de tempo, por um determinado preço (CALIXTO, 2009).

Numa visão técnica do setor elétrico, Kagan, Oliveira e Robba (2005, grifo do autor) indicam que: "A demanda de uma instalação é a carga nos terminais receptores tomada em valor médio num determinado intervalo de tempo".

Segundo a Resolução 456 da ANEEL, Demanda de Energia (DE) é a média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado.

Nessa perspectiva, a demanda serve para dimensionar e pagar a implantação e conservação dos sistemas elétricos, materiais e equipamentos necessários ao transporte da energia até a unidade consumidora. Esta resolução estabelece, através do contrato de prestação de serviço, entre distribuidora e consumidor, quatro tópicos:

a) Demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).
b) Demanda medida: maior demanda de potência ativa verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 (quinze) minutos expressa em quilowatts (kW).
c) Demanda de ultrapassagem: parcela da demanda medida que excede o valor da demanda contratada, expressa em quilowatts (kW).

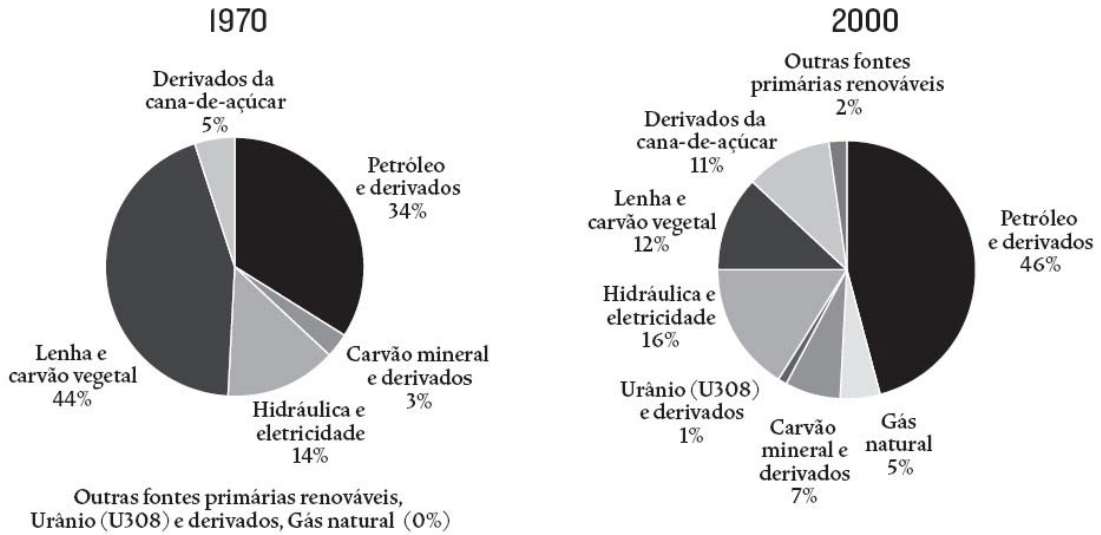


FIGURA 2 – Matriz energética brasileira.

Fonte: TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007, p. 50, adaptado.

d) Demanda faturável: valor da demanda de potência ativa identificado de acordo com os critérios estabelecidos e considerados para fins de faturamento, com aplicação da respectiva tarifa, expressa em quilowatts (kW).

Para o faturamento do consumo, acumula-se o total de kWh consumidos durante o período: fora de ponta seca ou fora de ponta úmida, e ponta seca ou ponta úmida. Para cada um destes períodos, aplica-se uma tarifa de consumo diferenciada, e o total é a parcela de faturamento de consumo. Evidentemente, as tarifas de consumo nos períodos secos são mais elevadas que nos períodos úmidos, e no horário de ponta é mais cara que no horário fora de ponta.

A cobrança é sempre em função da demanda contratada e do consumo. Quando se contrata uma demanda, na verdade se está solicitando que a empresa fornecedora disponibilize uma determinada quantidade de energia para ser consumida. Desta maneira, poderão ocorrer três casos de cobrança:

a) Demanda registrada inferior à demanda contratada: aplica-se a tarifa de consumo e demanda correspondente ao valor contratado.
b) Demanda registrada superior à demanda contratada, mas dentro da tolerância de ultrapassagem: aplica-se a tarifa de consumo e de demanda correspondente à demanda registrada.
c) Demanda registrada superior à demanda contratada e acima da tolerância: aplica-se a tarifa consumo e de demanda correspondente à demanda contratada, e soma-se a isso a aplicação da tarifa de ultrapassagem, correspondente à diferença entre a demanda registrada e a demanda contratada. Ou seja, paga-se tarifa normal pelo contratado, e tarifa de ultrapassagem sobre todo o excedente.

2.7.1. Controlador de demanda de energia elétrica

O controlador de demanda é o equipamento destinado a monitorar e controlar os valores de demanda de forma precisa e, de preferência, com a menor interferência no processo produtivo, já que para que ele realize o controle é necessário que este faça a retirada de alguma carga, com intuito de manter a demanda dentro dos limites pré-definidos (MATHEUS, 2003).

O método do controlador de demanda define a estratégia que este irá utilizar para monitorar e controlar a mesma – a ação de controle que determina a maior ou a menor precisão do controlador e o nível de interferência que o controlador irá efetuar na planta do consumidor. A estratégia do controlador poderá ser realizada de diversas maneiras, como por exemplo:

a) controle de demanda por projeção;
b) controle de demanda adaptativo;
c) controle de demanda por média móvel;
d) controle de demanda por valor acumulado;
e) controle de consumo programação horária.

Com sistemas de monitoramento contínuo é possível avaliar os perfis de consumo e ações que podem ser planejadas para que haja um consumo mais racional de energia. Além disso, eles permitem verificar o impacto real de ações de redução de energia, pois com o histórico de consumo da planta, é possível verificar qual foi o valor antes e depois da implantação da ação analisada e verificar o seu impacto na redução de gastos com energia.

Os sistemas de gerenciamento e controle de demanda contam com algoritmos que verificam continuamente a curva de demanda do sistema, observando tendências e descartando cargas sempre que o sistema entender que poderá haver ultrapassagem da demanda estabelecida como limite. O monitoramento é realizado através de *softwares* supervisores ou através da Internet. Os dados são armazenados em dispositivos específicos ou em um servidor com *software* de supervisão.

2.8. Sistemas embarcados

Um sistema embarcado é um programa gravado em um microcontrolador ou microprocessador e é utilizado para tarefas individualizadas (PONT, 2002).

Para Rocha (2005), na década passada, a maioria dos dispositivos dedicados era gerenciada por microcontroladores, tendo sua programação por vezes feita em linguagem Assembly ou outra solução proprietária.

Com a crescente demanda por maior conectividade, acesso à Internet e funções multimídia, procuram-se dispositivos dedicados mais robustos. Os fabricantes de dispositivos resolveram as limitações dos ambientes microcontrolador buscando soluções com sistemas operacionais modularizados e eficientes, atendendo assim à nova demanda de mercado. Baseado neste novo conceito de sistemas operacionais modularizados, um *Embedded System* – sistema embarcado – é qualquer dispositivo microcontrolado que execute uma função dedicada.

O sistema operacional para este tipo de dispositivo deve ainda ser bastante customizado, privilegiando atividades dedicadas ou exclusivas, envolvendo otimizações específicas no hardware e na camada de aplicação (ROCHA, 2005, p.1).

Desta forma algumas plataformas não permitem a implantação de um sistema operacional, devido as suas restrições físicas computacionais, tendo assim o programador que utilizar outras metodologias de controle de *software* como, por exemplo, as máquinas de estados.

2.8.1. Sistemas operacionais

Shaw (2003) exprime que o sistema operacional é uma camada de *software* que opera entre o *hardware* e os programas aplicativos voltados ao usuário final. O sistema operacional é uma estrutura de *software* ampla, muitas vezes complexa que incorpora aspectos de baixo e alto nível.

2.8.2. Máquina de estados

De acordo com Wagner *et al*. (2006), a máquina de estado é um modelo do comportamento composto de um número finito de estados, transições entre aqueles estados e ações. Uma máquina de estado é um modelo abstrato de uma máquina com uma memória interna primitiva. O conceito geral é: um modelo de comportamento composto por um número finito de estados, transições e eventos que geram essas transições.

2.8.3. Microcontroladores

Segundo Tooley (2007), o microcontrolador é um pequeno computador integrado de um único *chip*, possuindo várias características em comum com o computador:

a) CPU (*Central Processing Unit*) ou Unidade de Processamento Central que executa programas;
b) RAM (*Random Access Memory*) ou Memória de Acesso Aleatório onde são armazenadas as variáveis;
c) dispositivos de entrada e saída para interagir com mundo externo.

Os microcontroladores são minicomputadores de propósito específicos embutidos no interior de outros dispositivos para que possam controlar as funções ou ações do produto, dedicam-se a um programa específico e o executam, o qual é armazenado na memória apenas de leitura (*Read Only Memory* – ROM) e geralmente são de baixa potência.

Seus componentes internos (periféricos) são projetados para minimizar o tamanho e serem os mais econômicos possíveis, tornando-os pequenos e mais baratos.

A maioria dos microcontroladores está embasada no conceito de Computador com Conjunto de Instruções Complexo (*Complex Instruction Set Computer* – CISC). Uma CPU CISC normalmente tem mais de 100 instruções e muitas delas são poderosas e específicas para realização de algumas tarefas. O programador deve ser muito competente, pois cada instrução se porta de uma maneira específica. Algumas delas operam somente em certos espaços de endereços ou registradores e outras podem somente reconhecer certo tipo de modo de endereçamento (SILVA, 2002).

O conceito RISC, que é o complementar de CISC, está se espalhando pelos sistemas dedicados. O termo RISC significa Computador com Conjunto de Instruções Reduzido (*Reduced Instructions Set Computer*). Essas máquinas oferecem poucas instruções e, por isso, sua unidade de controle é mais simples permitindo que se obtenha uma melhor otimização (SILVA, 2002).

2.8.4. Microcontroladores AVR

Os microcontroladores AVR, fabricados pela ATMEL®, são arquiteturas de 8 bits, desenvolvidos sob as tecnologias RISC e HARVARD. Eles possuem um barramento para dados e outro para programa, o que permite maior velocidade no tratamento dos dados e do programa (MOTTA; MALLMANN; OLIVEIRA, 2005).

A ATMEL disponibiliza gratuitamente o *software* denominado AVR Studio, que é uma IDE e um simulador para a família AVR, além de prover módulos para a gravação no microcontrolador.

O WinAVR é um compilador gratuito, eficiente e flexível para os AVR em ambiente Windows. Acompanha uma extensa biblioteca de funções que podem ser incluídas nos programas, o AVRlibc.

2.8.5. Linguagem de programação C

De acordo com Schildt (1996), a linguagem de programação C foi primeiramente criada por Dennis Ritchie e Ken Thompson nos laboratórios da empresa Bell, em 1972. C foi baseada na linguagem B de Thompson, que por sua vez era uma evolução da Linguagem BCPL. Esta linguagem foi inicialmente desenvolvida para programar o Sistema Operacional UNIX.

A linguagem C é frequentemente dita de nível médio para computadores, pois combina elementos de alto nível com a funcionalidade da linguagem Assembly. Permite a manipulação de bits, bytes e endereços. Um código escrito em C é muito portável, o que significa que é possível adaptar um *software* escrito de um tipo de sistema operacional a outro (SCHILDT, 1996).

2.9. Comunicação de dados

De acordo com Sousa (1999), a comunicação é a transferência de informação entre um transmissor e um receptor. O estudo dos meios de transmissão

de mensagens digitais ou analógicas e o uso de dispositivos externos ao circuito transmissor da mensagem é o conceito base da comunicação de dados. A troca de informação é realizada através de um canal que é um caminho sobre o qual a informação pode trafegar. Ela pode ser definida por uma linha física: condutor elétrico, ondas de rádio, cabos ópticos e formas de ondas irradiadas.

2.9.1. Redes de computadores

De acordo com Murhammer *et al*., (2004), a arquitetura da Internet foi criada pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos com o objetivo de se ter uma rede interligando várias universidades e órgãos do governo de maneira descentralizada (ARPANET), para evitar a sua destruição no caso de ocorrência de uma guerra. Com o passar do tempo, esta idéia inicial perdeu o sentido e a infraestrutura foi aproveitada para se tornar o que hoje é a maior rede de computadores do mundo. A Internet fundamenta-se praticamente sobre um serviço de rede não orientado à conexão (datagrama não confiável). O Internet Protocol (IP) é um serviço de transporte orientado à conexão, oferecido pelo *Transmission Control Protocol* (TCP). Juntos, esses protocolos se completam oferecendo um serviço confiável de uma forma simples e eficiente: o TCP/IP. Este foi projetado como um modelo com quatro camadas, onde cada uma executa um conjunto bem definido de funções de comunicação (FELIPE, 2005).

Na Internet, os protocolos utilizados fazem parte de um conjunto, uma suíte (SOUSA, 1999). Os endereços IP identificam cada componente na rede, devendo ser únicos e utilizarem a faixa idêntica dentro da mesma rede. Um endereço IP é composto de uma sequência de 32 bits, divididos em 4 grupos de 8 bits cada (AXELSON, 2003).

2.9.2. Protocolos de aplicação

Segundo Murhammer *et al*. (2004), os protocolos de aplicação relacionam a estrutura de comunicação entre seus usuários. Existem basicamente dois tipos de arquitetura: Cliente-Servidor e Peer-to-Peer. A arquitetura de aplicação deve ser escolhida por seu desenvolvedor, que determina o modo pelo qual esta vai se comportar nos sistemas finais em uma rede.

Cliente-Servidor: baseado em requisições e respostas. O computador cliente requisita uma informação a outro computador (servidor), que responde a solicitação, enviando o que foi pedido (UNICAMP, 2009). A maioria das aplicações na internet é baseada neste modelo.

2.9.3. Ethernet

Mokarzel e Carneiro (2004) dizem que a camada de rede mais popular para uma Local Area Network (LAN) é a Ethernet (IEEE 802.3) que utiliza cabo UTP categoria 5E (cabo azul), seguido pela rede IEEE 802.11b com o emprego das redes sem fio.

As definições exercidas pela IEEE 802.3 determinam padronização de banda de passagem, interfaces físicas e formato do *frame* Ethernet. Esta é subdividida em quatro subcamadas:

a) especificação de mídia;
b) subcamada física (PHY);
c) subcamada de controle de acesso à mídia (MAC 802.3);
d) subcamada de controle lógico do link (LLC).

Na Figura 3 é demonstrada uma comparação entre os modelos: OSI, TCP/IP e Ethernet.

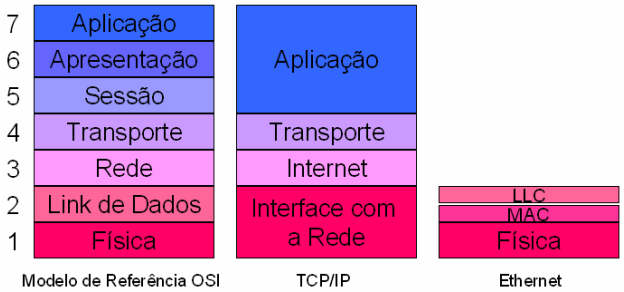


FIGURA 3 – Comparação entre os modelos: OSI, TCP/IP e Ethernet.

Fonte: CLUBE DO HARDWARE, 2007.

A Ethernet se caracteriza, portanto, como a parte física que liga a camada de *software* a outros equipamentos.

3. APLICAÇÃO E RESULTADOS

3.1. Materiais e métodos

O desenvolvimento e estudo foram realizados no laboratório de TCC do Departamento Acadêmico de Eletrônica, do Campus Florianópolis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, durante o período de agosto de 2009 a julho de 2010.

A pesquisa bibliográfica buscou efetuar o levantamento das características necessárias para o desenvolvimento do equipamento que realizaria a medição de energia elétrica e comunicação com a rede Ethernet.

Na sequência, realizou-se o desenvolvimento do *hardware* e *software* embarcado através de metodologia própria para programação de

dispositivos e confecções de placa de circuitos impresso.

Efetuou-se o levantamento das informações técnicas e principais características, e alguns pontos foram selecionados como relevantes para o desenvolvimento:

a) qual tipo de equipamento;
b) quais grandezas elétricas;
c) formas de medição;
d) quais métodos de controles de cargas seriam utilizados;
e) características econômicas.

Através destes questionamentos, gerou-se uma série de pesquisas bibliográficas e consultas a fabricantes do ramo energético, especialmente empresas que desenvolvem ou implantam soluções em controle de demanda. Essas indagações objetivaram coletar o maior número de informações sobre as soluções já existentes no mercado. Como os fabricantes não disponibilizam as características construtivas dos equipamentos, devido à propriedade industrial, os dados coletados ficaram restritos às informações técnicas disponíveis, tais como:

a) Características físicas (peso e dimensões).
b) Tensão de alimentação.
c) Interface Homem Maquina (IHM).
d) Número de saída a ser controlada.
e) Tipo de ligação trifásica (Y ou Δ) e monofásica.
f) Níveis de tensão para leitura.
g) Formas de registro (valores e períodos).
h) Formas de alertas.
i) Comunicações.

A partir destas análises, construiu-se um diagrama de blocos com o intuito de visualizar a solução como um todo.

A escolha dos microcontroladores AVR da ATMEL foi motivada pelos seguintes fatores: a interface de programação (AVRStudio) é da própria fabricante do chip e a mesma disponibiliza-o "gratuitamente"; documentação técnica e *Application Notes* (AN) de fácil acesso e pesquisa; comunidade de desenvolvedores disponibilizam seus trabalhos e experiências, acentuando a curva de conhecimento.

Na Figura 4 é apresentado o diagrama de blocos e dispositivos empregados no projeto.

3.1.1. Medição

Para medição de tensão e corrente, empregou-se o circuito integrado de conversão analógico para digital, ADE7758, da Analog Devices. Este componente mostrou-se muito robusto e a sua arquitetura permite, por meio de configurações de registradores, realizar medições em sistemas monofásicos, bifásicos ou trifásicos.

Incorpora ainda funções de voltímetro e amperímetro RMS, medidor de frequência e sensor de temperatura do *chip*, detecção de anomalias na rede, interrupção por pico de tensão ou corrente ocorrida por fase.

Segundo a documentação deste componente, o uso de TC e divisores resistivos são classificados como circuitos de medição. Contudo, observaram-se limitações na escala de medição de tensão (1 volt de pico a pico) e corrente (40 mA) por fase de leitura.

Na Figura 5, é apresentada a placa de aquisição de dados, onde o destaque em pontilhado apresenta os TC, e o tracejado os conectores e os divisores de tensão da rede que serão medidos.

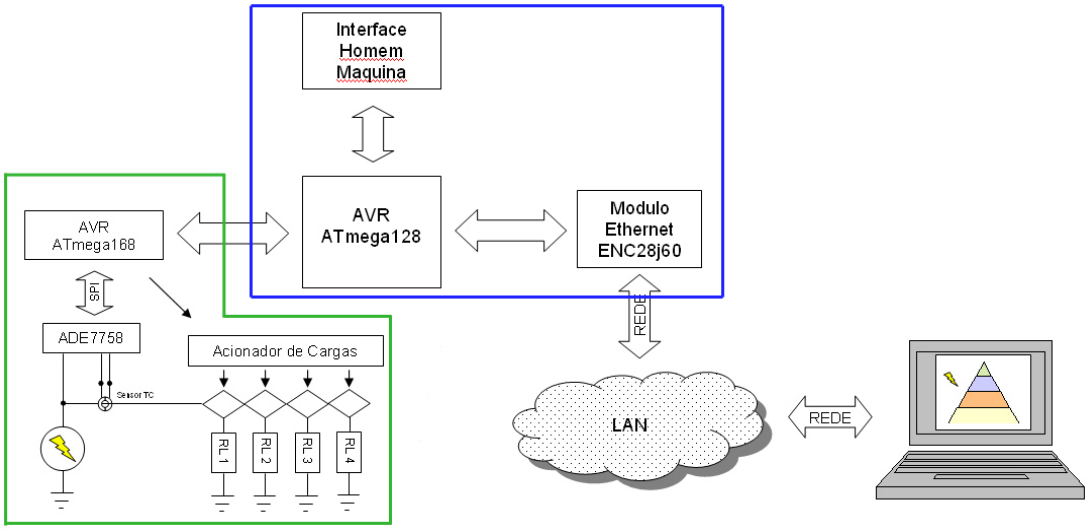


FIGURA 4 – Diagrama de blocos do projeto.

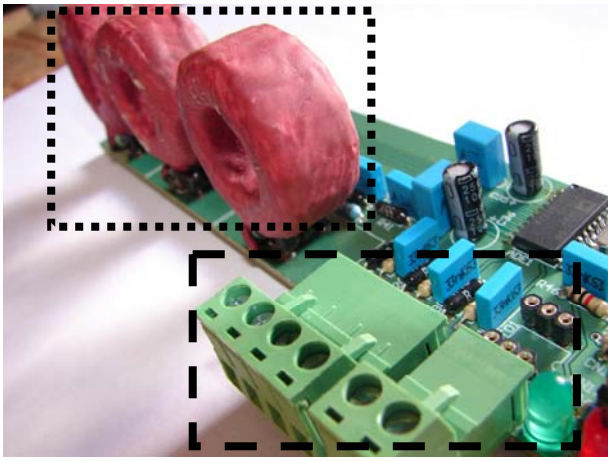


FIGURA 5 – Placa de aquisição de dados.

Os dados adquiridos analogicamente são convertidos em valores digitais através do ADE7758. Com esta aquisição de dados, realizam-se funções matemáticas, filtros digitais e correções de calibração, disponíveis no próprio dispositivo conversor, que possibilita efetuar configurações em seus registradores e leitura de seus respectivos valores.

Para controlar e gerenciar a placa de aquisição de dados utilizou-se o microcontrolador Atmega168 (AVR) com linguagem C, empregando a IDE AVRStudio com o compilador WinAVR.

3.1.2. Módulo Ethernet

O CI responsável pela camada MAC e PHY é desenvolvido pela Empresa Microchip, o integrado ENC28J60. Tal componente é um controlador específico para comunicação Ethernet, comunicando-se via SPI, e se torna uma interface capaz de migrar para inúmeras plataformas microcontroladas.

É compatível com a especificação IEEE 802.3 para o protocolo de comunicação de rede, inclui uma série de filtros de pacotes para reduzir o número de dados recebidos e possui DMA interno, amplificando a velocidade de comunicação.

Durante a pesquisa de qual plataforma microcontrolada seria utilizada, buscou-se um componente que atendesse o *hardware* mínimo proposto por Mokarzel e Carneiro (2004), sendo: memória de programa (Flash) 32 kilobytes (kB), 2 kB de memória RAM e portas de comunicação compatíveis com controlador Ethernet.

Esta limitação ocorre devido ao pacote TCP/IP, seguindo a padronização das RFC, a qual determina que a string de dados a ser transmitida em uma rede com este protocolo não deve ultrapassar 1500 bytes, e o mínimo é 300 bytes.

A seguir, procurou-se integrar o microcontrolador Atmega128 e o controlador Ethernet ENC28J60. Na Figura 6, é apresenta a placa do módulo Ethernet.

Em conjunto com esta pesquisa, foram analisados dois projetos Tuxgraphics[1] e Roland Riegel[2], que agregaram uma grande parcela de conhecimentos sobre os protocolos de rede, as camadas de aplicação e *hardware*.

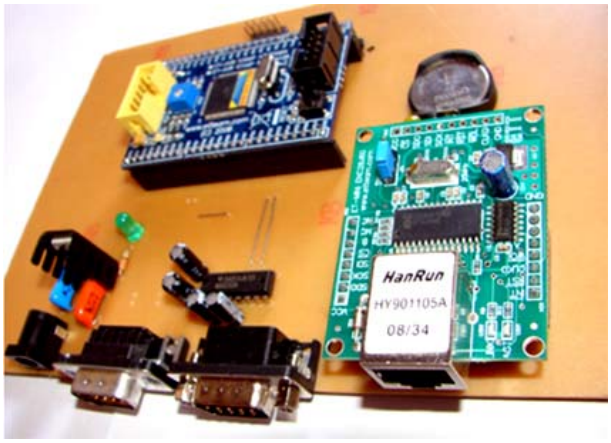


FIGURA 6 – Módulo Ethernet.

3.1.3. Bancada para testes e ensaios

A bancada foi construída com dez (10) cargas resistivas – lâmpadas de 200 watts cada – que são acionáveis através da placa de controle, proporcionando a possibilidade de variação de potência. Na Figura 7, são mostrados os módulos de Ethernet (pontilhado), medição (tracejado) e placa de controle de carga (indicado pela seta), instalados na bancada de teste.

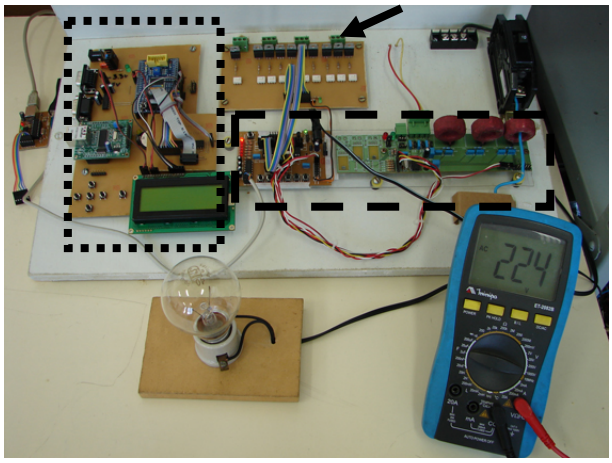


FIGURA 6 – Bancada de testes, vista frontal.

Com base na carga disponível na bancada (2000 watts), definiram-se 4 patamares de controle, utilizando para o cálculo de demanda: com a soma algébrica da potência consumida, dividida pelo número de amostras colhidas em um intervalo de 15 minutos, se obtém a demanda de potência requerida do sistema. As regras que se definiram foram:

[1] Disponível em <http://www.tuxgraphics.org>.
[2] Disponível em <http://www.roland-riegel.de>.

a) Potência maior que 1000 e menor que 1150 watts: 1 Carga desligada;
b) Potência maior que 1150 e menor que 1300 watts: 2 Cargas desligadas;
c) Potência maior que 1300 e menor que 1500 watts: 3 Cargas desligadas;
d) Potência maior que 1500: 5 Cargas desligadas.

Com este exemplo de regras, a estabilização na potência consumida foi alcançada no patamar entre 1150 e 1300 watts. Executaram-se testes forçados onde se inseriu uma carga adicional de 1200 watts; o disjuntor para proteção desarmou-se após 30 segundos.

O controle realizado na carga obteve sucesso, pois efetuou os devidos desligamentos das cargas, assim como sua reativação quando o consumo requerido apresentou folga para o mesmo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para o crescimento econômico é fundamental que o setor energético forneça o suporte necessário. A otimização da quantidade de energia consumida conduz à eficiência energética, com redução efetiva da fatura, melhoria da transmissão e uso dos recursos energéticos de forma apropriada, o que vai ao encontro da preocupação com as alterações climáticas, gerando redução dos impactos ambientais e sociais.

Um gerenciador de energia possibilita redução nas despesas com energia elétrica, pois é capaz de monitorar o consumo e a demanda de maneira contínua, além de fornecer dados que permitam a análise do comportamento da mesma, com posterior deliberação de medidas corretivas por parte do usuário.

A aplicação do controlador de demanda necessita de investimento em instalações, alterações na rede elétrica, análise do consumo estimado, balanceamento de cargas através de setores, softwares, treinamentos, compra do equipamento, além de outras mudanças indiretas para que o sistema seja eficiente. Entretanto, sem o uso de um gerenciador de energia, o custo de produção tende a elevar-se devido às multas, tributos e valores de demanda contratada de forma inapropriada.

A montagem do protótipo tornou possível realizar experimentos práticos em bancada, que confirmaram a viabilidade e operacionalidade do projeto, com vista à inserção no mercado.

Contudo, os testes e ensaios não chegaram à etapa de integração das placas devido ao período reduzido de desenvolvimento. Esta etapa tinha como meta utilizar os recursos dos módulos construídos para realizar o controle de cargas e coleta de dados e para gerenciar as medidas corretivas cabíveis.

O ambiente de pesquisa propiciou adequação do conhecimento adquirido durante o curso, com as questões práticas necessárias ao perfil de um desenvolvedor de projetos, integrando o acadêmico à vivência do mercado de trabalho, sem esquecer o compromisso com uma sociedade mais consciente de usufruir dos recursos materiais e ambientais de forma sustentável.

Agradecimentos

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IF-SC) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ).

Aos professores e técnicos do Departamento de Eletrônica (DAELN – IF-SC).

Aos amigos e colegas que contribuíram com sugestões e doações ao trabalho.

A Mayara Pereira Silva pela contribuição na escrita deste artigo.

Ao professor orientador técnico Muriel Bittencourt de Liz e a professora de metodologia Cláudia Regina Silveira.

REFERÊNCIAS

AXELSON, Jan. **Embedded Ethernet and Internet complete**: Designing and Programming Small Devices for Networking; Lakeview Research LLC, 2003, 497 p.

BRASIL. ANEEL **Cadernos temáticos ANEEL tarifas de fornecimento de energia elétrica**. 2005. 30 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/caderno4capa.pdf>. Acesso em mar. 2010.

BRASIL. ANEEL – **Cartilha** – Perguntas e respostas sobre tarifas das distribuidoras de energia elétrica – Brasília; 2007. 16 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/Perguntas_e_Respostas.pdf>. Acesso em abr. 2010.

BRASIL. ANEEL. **Cartilha** – Por dentro da conta de luz: informação de utilidade pública. 4. ed. Brasília: 2008. 34 p; Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha_1p_atual.pdf>. Acesso em abr. 2010.

BRASIL. ANEEL. **Resolução N.º 456**. 2000. p. 57. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf, Acesso em abr. 2010.

BRASIL. EPE – **Série estudos de energia**, (2009). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/Série Estudos de Energia/20091026_1.pdf>. Acesso em jun. 2010.

CALIXTO. Leonardo Luís, **Texto complementar 2** – Fluxo de Renda, 2009, 13 p. Disponível em: <http://professores.goianesia.ueg.br/leonardo/arquivos/Texto_Compl_2.pdf>. Acesso em mai. 2010.

CELESC **Tabela de preços**, 2010. Disponível em: <http://portal.celesc.com.br/portal/atendimento/index.php?option=com_content&task=view&id=286&Itemid=94>. Acesso em jun. 2010.

CONCESSIONÁRIA SANTO ANTONIO ENERGIA **Panorama do setor de geração**; 2009. Disponivel em: <http://www.santoantonioenergia.com.br/site/portal_mesa/pt/energia/geracao/geracao.aspx>. Acesso em mai 2010.

CLUBE DO HARDWARE Disponível em <http://www.clubedohardware.com.br/artigos/1351/6>. Acesso em jan. 2007.

FELIPE, Daniel Santana. **Desenvolvimento de um canal de comunicação seguro entre agentes distribuídos e *firewall***; Presidente Prudente: UNOESTE, 2005, 70 p.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. de; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de energia elétrica**. São Paulo: Editora Blücher, 2005 328 p.

LEÃO, Ruth. **Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**: Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia - Departamento de Engenharia Elétrica, 2009. Disponivel em: <http://www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/1Introducao.pdf>. Acesso em jun. 2010.

MATHEUS. Henrique. **Controladores de demanda**; Universidade Federal de Mato Grosso Faculdade de Engenharia e Tecnologia, Cuiabá, 2003, 32 p. Disponível em: <http://www.ejm.com.br/download/Demanda.pdf>. Acesso em mai. 2010.

UNICAMP **Mini curso – Internet**, 2009. Disponível em: <http://www.ccuec.unicamp.br/treinamento_int2004/naveg40/oqueeh1.html>. Acesso em mai. 2010.

MOKARZEL, Marcos Perez; CARNEIRO, Karine Perez Mokarzel. **Internet Embedded TCP/IP para microcontroladores**. 1ª edição. São Paulo: Editora Érica, 2004, p. 340.

MOTTA. Débora; MALLMANN. Rafael; OLIVEIRA. João, **AVR – 8 bit Atmel**; Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Guaíba, 2005, 38 p. Disponível em: http://www.gritee.com/participantes/mallmann/avr-atmel.pdf. Acesso em: 23 Maio 2010.

MURHAMMER. Martin W.; ATAKAN. Orcun; Bretz. Stefan; PUGH. Larry R.; SUZUKI. Kazunari; WOOD. David H. **TCP/IP tutorial and technical overview** - IBM Corporation, International Technical Support Organization; 6ª Edition; year 2004; 998 p. Disponível em: www.ibm.com/redbooks. Acesso em: 23 Maio 2010.

PONT. Michael J. **Embedded C**. Addison – Wesley An imprint of Pearson Education Limited, 2002, 321 p.

ROCHA. Rodrigo, Artigo: **O que são dispositivos dedicados (*Embedded Systems*)?** Introdução sobre os sistemas operacionais Windows Embedded, suas vantagens e aplicações; Microsoft, 2005. Disponível em: http://www.compusoftware.com.br/embedded/html/conteudo/txt_inside05.htm. . Acesso em: 23 Maio 2010.

SCHILDT, Herbert. **C completo e total**. 3. ed. Tradução: Roberto Carlos Mayer. São Paulo: Makron Books, 1996. 827 p.

SHAW. Alan C., **Sistemas e *software* de tempo real**; Tradução Ana M. Alencar Price. BOOKMAN, Porto Alegre, 2003, 240p.

SILVA. Juarez Bento da, **Monitoramento, aquisição e controle de sinais elétricos, via *web*, utilizando microcontroladores**. – UFSC, 2002, 123 p. Disponível em: http://www.tede.ufsc.br/teses/PGCC0387.pdf . Acesso em: 20 Maio 2010.

SOUSA, Lindeberg Barros de. **Redes de computadores**: dados, voz e imagem. Érica, São Paulo, 1999, 484 p.

TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amilcar e GORINI, Ricardo. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva**. Novos estudos - CEBRAP; 2007, n.79, p. 47-69. Disponível em: http://www.scielo.br/pdf/nec/n79/03.pdf. Acesso em: 25 de Março de 2010.

TOOLEY. Mike, **Circuitos eletrônicos** – fundamentos e aplicações, Tradução Luis Cláudio de Queiroz Faria; 3ª edição, Rio de Janeiro, Elsevier, 2007, 407p.

TORREIRA. RAUL PERAGALLO, **Instrumentos de medição elétrica**, Editora Hermus, 1978, 215 p.

WAGNER. Ferdinand; Schmuki. Ruedi; Wagner. Thomas; Wolstenholme Peter. **Modeling software with finite state machines**, Taylor & Francis Group, 2006, 369 p.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

UMA INVESTIGAÇÃO DAS EMISSÕES CONDUZIDAS E RADIADAS DE UMA ESTAÇÃO DE SOLDA COM TEMPERATURA AJUSTÁVEL OPERANDO EM VÁRIAS SITUAÇÕES DE CARGA

Alexandre Albarello Costa[1], Celso Luis de Souza[2], Diego de Moura[3], Ingrid Carolini Cezário[4]

Resumo: Este trabalho apresenta uma investigação sobre as emissões eletromagnéticas conduzidas e radiadas de uma estação de solda com temperatura ajustável. A partir de um modelo comercial, foram realizados ensaios de emissões radiadas e conduzidas no Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética – MAGLAB da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Os resultados foram comparados com a norma adequada a este tipo de equipamento, verificando o seu possível enquadramento nos limites definidos pela mesma. Percebeu-se que, em alguns pontos, os limites estavam superiores ao desejado. Uma investigação sobre os motivos pelos quais a estação de solda não estava atendendo à norma foi realizada através da análise do circuito, com simulações no *software* Pspice e medições das formas de onda com osciloscópio. Foram sugeridas e implementadas modificações para mitigar os problemas encontrados. Novos ensaios foram realizados para a verificação da eficácia das modificações.

Palavras-chave: Compatibilidade. Eletromagnetismo. Estação de solda.

***Abstract**: This paper presents an investigation on the radiated and conducted electromagnetic emissions of a temperature-controlled soldering station. At the Laboratory of Electromagnetism and Electromagnetic Compatibility – MAGLAB – UFSC (Federal University of Santa Catarina), conducted and radiated emission tests were performed on an off-the-shelf equipment. EMC compliance with applicable standard was checked. Radiated and conducted emission levels were higher than desired and the equipment did not meet the standard. PSpice simulation software and oscilloscope waveform measurements were used to help circuit analysis in order to investigate the non-compliance reasons. Modifications were suggested and implemented to mitigate the problems. New tests were performed to verify the effectiveness of these modifications.*

***Keywords**: EMC. Electromagnetism. Soldering station.*

[1] Doutorando EEL/UFSC <aleac.eng@gmail.com>.
[2] Engenheiro Eletrônico Sênior da Reason Tecnologia S/A <celso@ieee.org>.
[3] Mestrando EEL/UFSC <diegocefetsc2000@yahoo.com.br>.
[4] Mestranda EEL/UFSC <cezario@gmail.com>.

1. INTRODUÇÃO

O uso cada vez maior de equipamentos eletrônicos, que frequentemente operam próximos de outros sistemas eletroeletrônicos, bem como a explosão no número de sistemas de comunicação sem fio resulta numa preocupação sobre os efeitos das interferências eletromagnéticas (EMI). Circuitos mais rápidos e complexos são cada vez mais miniaturizados, aumentando a probabilidade de que dispositivos que contenham estes circuitos interajam entre si de maneira adversa. Os equipamentos eletrônicos modernos devem, portanto, estar aptos não só a funcionar perfeitamente neste ambiente poluído eletromagneticamente, como também não contribuir significativamente para o aumento nas emissões neste ambiente, atingindo assim os objetivos da Compatibilidade Eletromagnética (EMC).

Usualmente os efeitos da interferência eletromagnética só são descobertos na fase de testes. A solução destes problemas nas fases finais do desenvolvimento do produto geralmente implica

a adição de componentes, que aumentam a complexidade e o custo, além de reduzirem a confiabilidade. Adicionalmente, é ilegal a venda de produtos que não atendam às regulamentações governamentais (quando aplicáveis) de emissões eletromagnéticas. É, portanto, desejável que os problemas de emissões e susceptibilidade eletromagnética sejam tratados nas fases iniciais do projeto.

Frequentemente as causas dos problemas relacionados à EMC não são encontradas, devido a concepções errôneas compartilhadas por muitos engenheiros. Muito do material apresentado aos estudantes de engenharia elétrica representa simplificações de conceitos mais abrangentes. O mais fundamental entendimento do comportamento de dispositivos e sistemas eletrônicos requer a aplicação das equações de Maxwell e técnicas de sinais e sistemas, porém, a aplicação destes conceitos a circuitos simples é complicada e trabalhosa. Para evitar esta complexidade, uma técnica de análise aproximada, conhecida como teoria dos circuitos elétricos, é utilizada para descrever os dispositivos operando a uma frequência baixa. A Lei de Kirchhoff da Tensão e da Corrente provém das Leis de Faraday e de Ampère, respectivamente.

Infelizmente, os conceitos básicos da teoria de eletromagnetismo (bem como em outras áreas da engenharia elétrica, como processamento de sinais e teoria de controles) são frequentemente apresentados de maneira isolada, sem a devida intercorrelação com outros conceitos. Por esta razão, a maioria dos engenheiros (erroneamente) espera que os elementos familiares de circuitos, como resistores, capacitores e indutores, sempre se comportem de maneira ideal, da maneira que foram apresentados nas disciplinas mais básicas.

A teoria de Compatibilidade Eletromagnética envolve a operação dos dispositivos eletrônicos num regime onde os casos especiais e as simplificações associadas ao "comportamento normal" não valem mais e requer um retorno a um conjunto mais fundamental de regras para se descrever o comportamento destes. Deve ser lembrado que os efeitos descritos pelos princípios fundamentais de eletromagnetismo estão sempre presentes e são simplesmente mais relevantes sob certas condições. O "comportamento não-ideal" é, na realidade, uma denominação incorreta porque implica que o dispositivo está operando de uma forma anormal, quando na realidade ele está se comportando de maneira perfeitamente natural. Somente através da aplicação dos princípios fundamentais é que o comportamento dos dispositivos poderão ser previsíveis em todas as condições de operação.

O que faz com que a tarefa de produzir sistemas eletromagneticamente compatíveis seja particularmente difícil é que, além do entendimento dos princípios básicos que governam o comportamento de um dispositivo, muitas vezes o projetista não pode antecipar quais os tipos de interferência ele vai encontrar e preparar-se para todas as contingências. Por exemplo, é impossível saber sob que circunstâncias um laptop vai operar. *Laptops* são utilizados em casa, em automóveis, construções, aviões, e mesmo em espaçonaves. Cada um desses ambientes apresenta problemas específicos. O mesmo *laptop* deve ser projetado para funcionar na presença de um secador de cabelos e não pode interferir com os instrumentos de uma aeronave comercial. Além disso, dispositivos cujo projeto mudou pouco em décadas podem ser colocados próximos a componentes de estado-sólido muito modernos. Por estas razões, os sistemas devem ser projetados não só para minimizar as emissões, mas também para ficarem imunes da interferência eletromagnética. Infelizmente, quanto mais complexo fica o ambiente eletromagnético, se torna mais difícil atingir este objetivo.

Apesar de todos estes argumentos, muitos fabricantes ainda não se adequaram às normas de compatibilidade eletromagnética, como é o caso do fabricante da estação de solda analisada neste trabalho.

2. A ESTAÇÃO DE SOLDA

A estação de solda utilizada nesta investigação foi um modelo TS-900 de 50 W do fabricante TOYO (Figura 1).

FIGURA 1 – Estação de Solda TOYO TS-900.

Fonte: TOYO, 2010.

Ao levantar-se o circuito elétrico deste equipamento, observou-se que é idêntico a um *dimmer* utilizado para lâmpadas incandescentes, que é descrito a seguir.

Um *dimmer* regula o fluxo de potência para uma carga resistiva, como uma lâmpada incandescente ou ferro de solda, de uma maneira

eficiente, permitindo que apenas uma porção da corrente em um ciclo de 60 Hz vá para a carga. A Figura 2 mostra um circuito simples que controla a potência de uma lâmpada. O controle da potência é feito alterando-se o ângulo de disparo durante cada semiciclo.

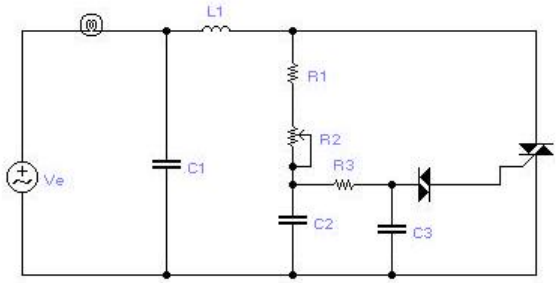


FIGURA 2 – Circuito básico de um *dimmer*.

Conforme a Figura 2, o capacitor C2 é carregado (no semiciclo positivo ou semiciclo negativo) através do potenciômetro de controle R2 e da resistência R1. Após um tempo, o DIAC dispara quando a tensão no capacitor C3 atingir a tensão de disparo (*breakover*). O capacitor C3 se descarrega através do DIAC e no *gate* do TRIAC, disparando-o para num determinado ângulo. A variação abrupta de corrente a partir do zero produz interferência eletromagnética. O indutor L1 e o capacitor C1 funcionam como um filtro que reduz essa interferência a um nível aceitável.

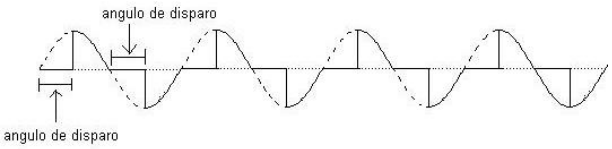


FIGURA 3 – Forma de onda de tensão na carga.

O circuito levantado da estação de solda TS-900 pode ser visto na Figura 4.

Nota-se que este circuito é basicamente o mesmo do *dimmer* apresentado na Figura 2, mas ele não contém nenhum filtro de linha, o que antecipa emissões conduzidas acima dos valores esperados.

3. NORMAS APLICÁVEIS

A norma CISPR 14-1 se aplica a emissões conduzidas e radiadas para equipamentos cujas funções principais são executadas por motores ou dispositivos de chaveamento e regulação, que incluem eletrodomésticos, ferramentas elétricas, controles utilizando dispositivos semicondutores, equipamentos médicos com motores, brinquedos elétricos/eletrônicos, caixas automáticos, projetores de slide e de cinema.

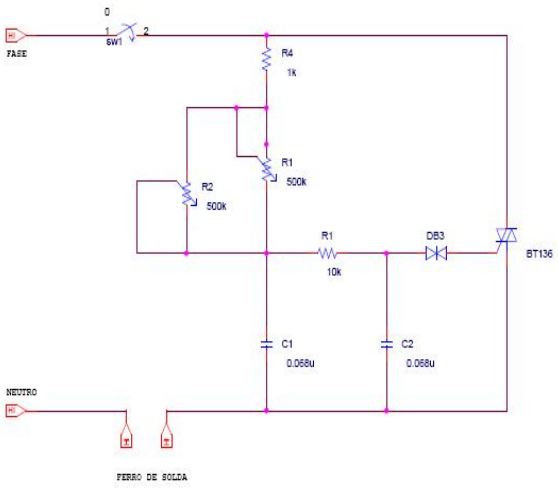


FIGURA 4 – Esquemático da estação de solda.

Como a estação de solda é uma ferramenta elétrica e utiliza semicondutores para controle, a norma CISPR 14-1 é a mais adequada para emissões radiadas e conduzidas.

4. RESULTADOS DO ENSAIO INICIAL

Para os ensaios, por questão de segurança, foi utilizada uma lâmpada incandescente de 60 W ao invés do ferro de solda (Figura 5).

FIGURA 5 – Montagem para ensaios.

Os ensaios, tanto para emissões conduzidas como para emissões radiadas, foram feitos em três condições de carga: mínima, média e máxima.

4.1. Emissões conduzidas

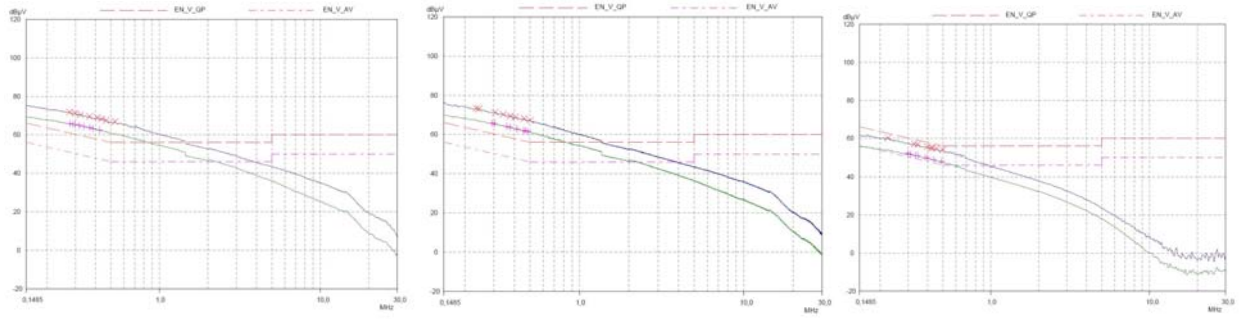
Os ensaios de emissões conduzidas foram realizados no dia 26/10/2009, em temperatura ambiente de 26 °C e umidade relativa de 60%. Os equipamentos utilizados foram o *EMI Test Receiver* 9 kHz a 2.500 MHz ROHDE & SCHWARZ (Figura 6(a)) e um LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) modelo ESH 3-Z5 831.5518.52 (Figura 6(b)).

(a) **(b)**

FIGURA 6 – (a) *EMI Test Receiver* e (b) *Line Impedance Stabilization Network*.

Fonte: ROHDE & SCHWARZ, 2010.

Os resultados dos ensaios, tanto em carga mínima (Figura 7(a)), média (Figura 7(b)) e máxima (Figura 7(c)), mostram que o equipamento não atende à norma CISPR 14-1 para emissões conduzidas. Isto já era esperado pelo fato de a estação de solda não possuir nenhum filtro de linha. Nota-se, porém, que, na condição de carga mínima, o nível de emissões é maior, pois a forma de onda da tensão aplicada à carga apresenta maior quantidade de harmônicos.



(a) **(b)** **(c)**

FIGURA 7 – Emissões conduzidas em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

Analisando-se a faixa de emissão conduzida acima do nível da norma CISPR 14-1, pode-se afirmar que o modo predominante é o diferencial (Figura 8).

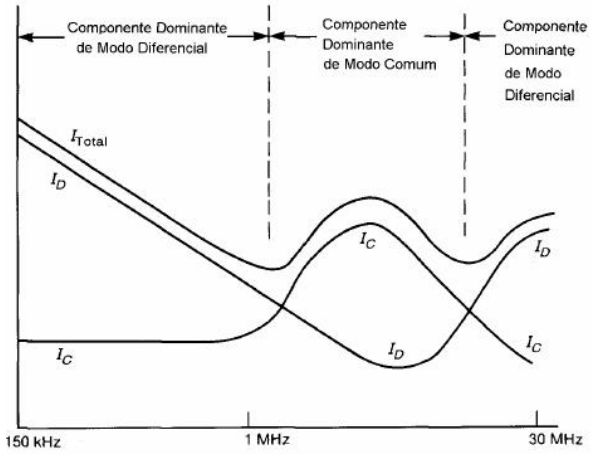


FIGURA 8 – Determinação de um modo de corrente sobre outra em emissões conduzidas.

Fonte: RAIZER, 2007.

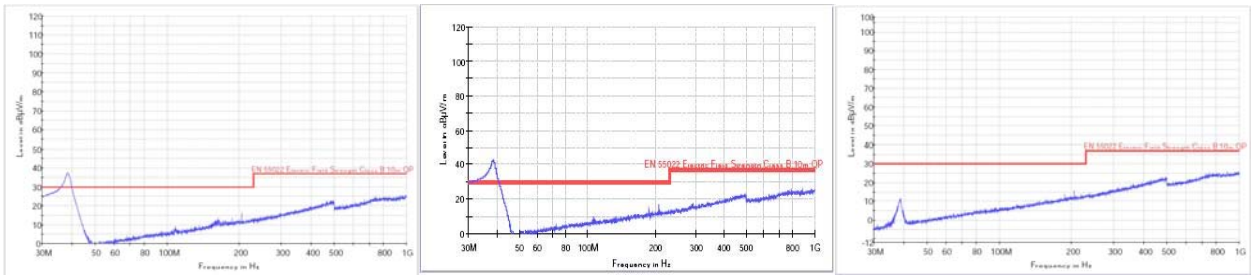
4.2. Emissões radiadas

Os ensaios de emissões conduzidas foram realizados no dia 26/10/2009, em temperatura ambiente de 23,5 °C e umidade relativa de 68%. Os equipamentos utilizados foram o *EMI Test Receiver* 9 kHz a 2.500 MHz ROHDE & SCHWARZ (Figura 6(a)) e uma célula GTEM (*Gigahertz Transverse-Electromagnetic*) (Figura 9).

FIGURA 9 – Célula GTEM.

Fonte: ROHDE & SCHWARZ, 2010.

Os resultados dos ensaios, tanto em carga mínima (Figura 10(a)) como em carga média (Figura 10(b)), mostram que, na frequência de aproximadamente 35 MHz, o equipamento apresenta um maior nível de emissões radiadas. Porém, no ensaio com carga máxima (Figura 10(c)), este nível em 35 MHz é bem menor. Na condição de carga mínima, o nível de emissões é maior, pois a forma de onda da tensão na carga apresenta maior quantidade de harmônicos. De qualquer maneira, o equipamento atende à norma CISPR 14-1 para emissões radiadas.



(a) **(b)** **(c)**

FIGURA 10 – Emissões radiadas em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

5. SIMULAÇÕES

Para simular o circuito da estação de solda, foi utilizado o simulador de circuitos analógicos PSPICE. O esquema representado na Figura 11 mostra o circuito completo com as não-idealidades dos componentes.

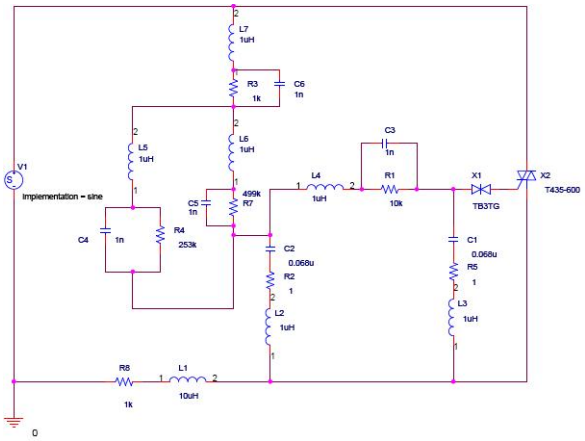


FIGURA 11 – Esquemático utilizado para simulação com não-idealidades.

As simulações obtidas são apresentadas nas Figuras 12, 13 e 14 e correspondem à carga mínima, média e máxima, respectivamente.

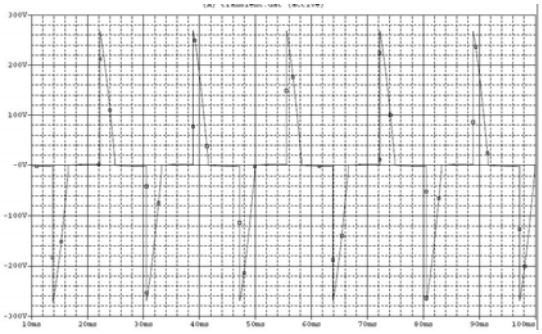


FIGURA 12 – Tensão na lâmpada – carga mínima – simulação PSPICE.

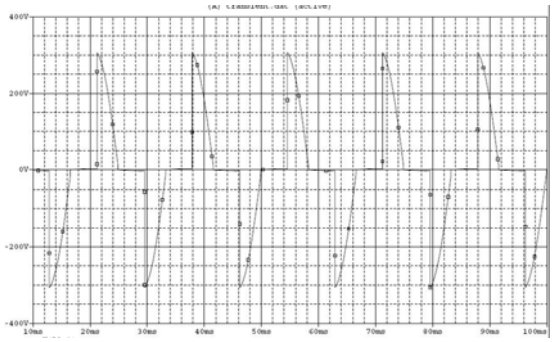


FIGURA 13 – Tensão na lâmpada – carga média – simulação PSPICE.

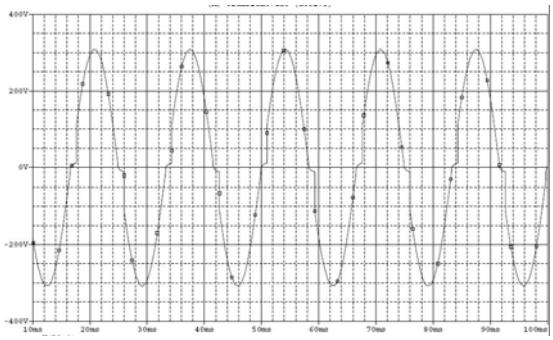
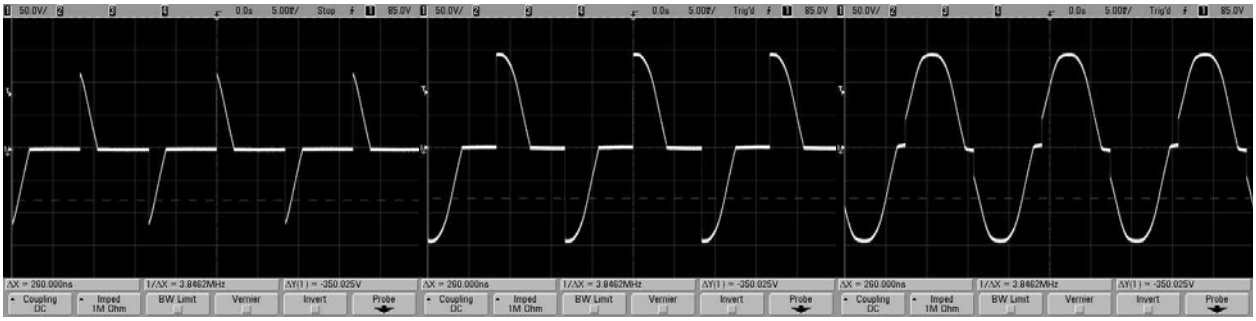


FIGURA 14 – Tensão na lâmpada – carga máxima – simulação PSPICE.

O objetivo destas simulações foi o de verificar o comportamento do circuito em diversas situações de carga, analisando-se suas formas de onda. Serviu também para simulações de filtros anexados ao circuito.

6. MEDIÇÕES COM O OSCILOSCÓPIO

As medições da tensão na carga, apresentadas nas Figuras 15(a), 15(b) e 15(c), comprovaram o resultado das simulações realizadas na seção anterior.



(a) **(b)** **(c)**

FIGURA 15 – Imagem de osciloscópio da tensão na lâmpada em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

7. MODIFICAÇÕES PROPOSTAS

Com a finalidade de se reduzirem emissões radiadas e, principalmente, as conduzidas, foram sugeridas propostas de modificação no circuito da estação de solda, que são descritas a seguir.

7.1. Trançamento dos fios da carga

Os fios condutores que ligam a estação ao ferro de solda foram trançados com passo de aproximadamente 1 cm. Não houve nenhuma mudança nas emissões radiadas e conduzidas. Esperava-se uma melhoria, mesmo que discreta, nas emissões radiadas, mas provavelmente o passo de trançamento utilizado não foi o adequado.

7.2. Novo *layout*

Observando-se o *layout* original da estação de solda, notou-se que este não apresentava plano de terra, além de trilhas com 90 mils. Um novo *layout* foi elaborado, com trilhas mais grossas, com curvas de 45° e polígonos ao invés de trilhas simples, aumentando a área de condução. O novo *layout* pode ser visto na Figura 16. As emissões conduzidas não sofreram nenhuma modificação em relação ao *layout* original. As emissões radiadas aumentaram na região de 35 MHz (Figuras 17(a), 17(b) e 17(c)). O aumento das emissões radiadas provavelmente se deve ao fato de o potenciômetro ter sido conectado à placa através de fios neste *layout* novo (por questões mecânicas). No *layout* original, o potenciômetro é soldado na própria placa de circuito impresso. As radiações podem estar ocorrendo justamente nestes fios.

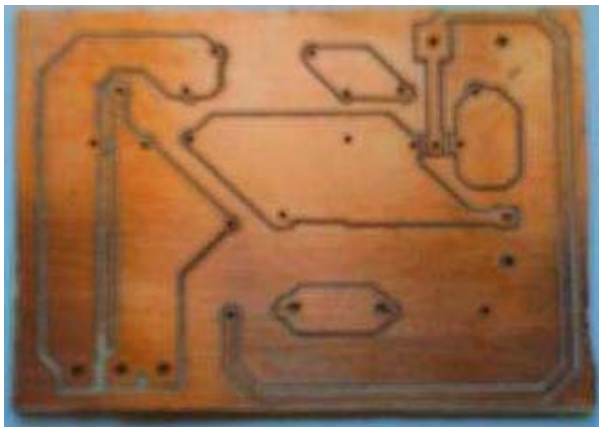
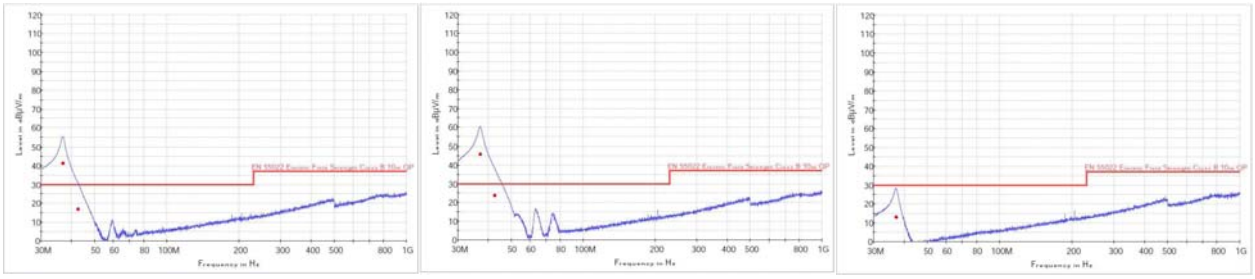


FIGURA 16 – Novo *layout*.

Mesmo após terem sido eliminados os ângulos de 90°, não houve alterações significativas nas emissões radiadas, pois esta medida só é válida para frequências acima de 1 GHz (MONTROSE, 1996).

7.3. Filtro de linha completo

Visando resolver principalmente o problema de emissões conduzidas, optou-se pela instalação de um filtro de linha completo usado em fontes de alimentação. O circuito pode ser visto na Figura 18.



(a) **(b)** **(c)**

FIGURA 17 – Emissões radiadas com novo *layout* em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

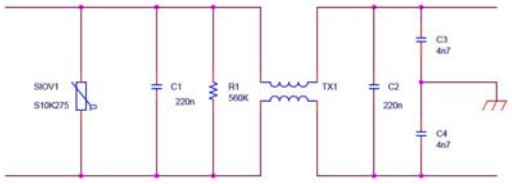
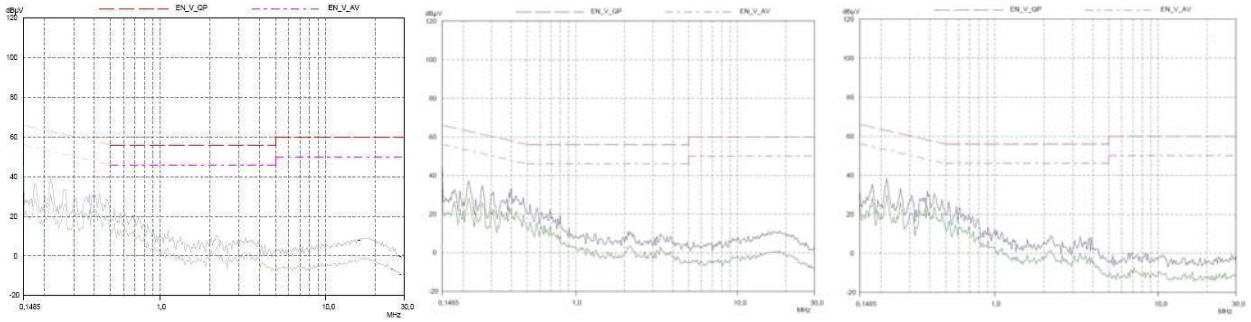


FIGURA 18 – Filtro de linha completo.

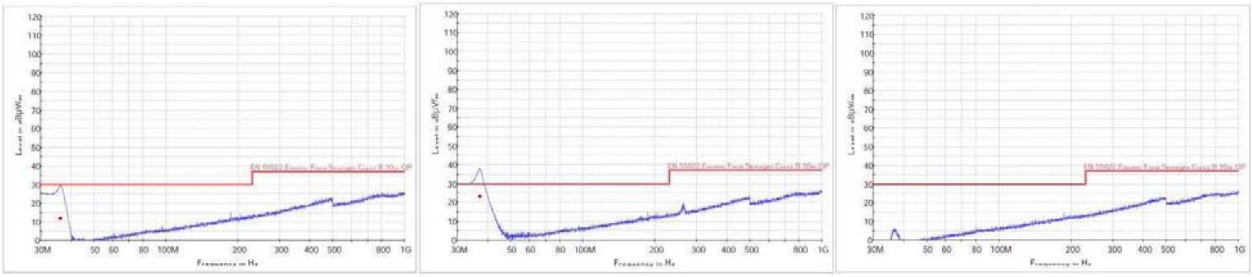
Este filtro reduziu drasticamente as emissões conduzidas (Figuras 19(a), 19(b) e 19(c)), porém não teve praticamente nenhum efeito sobre as emissões radiadas (Figuras 20(a), 20(b) e 20(c)).

O filtro atingiu o seu objetivo, mas é uma solução cara, face ao custo da estação de solda. Em função disto, optou-se outras modificações no circuito que fossem economicamente mais viáveis.



(a) (b) (c)

FIGURA 19 – Emissões conduzidas com filtro de linha completo em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.



(a) (b) (c)

FIGURA 20 – Emissões radiadas com filtro de linha completo em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

7.4. Filtro com 2 capacitores ligados à terra

Com o intuito de simplificar a topologia do filtro de linha utilizado no ensaio anterior, optou-se por uma estrutura mais simples com apenas dois capacitores de 4,7 nF entre fase e neutro e os mesmos ligados em um ponto comum de terra (Figura 21). Não houve nenhuma modificação nas emissões radiadas e conduzidas em relação ao equipamento sem filtro.

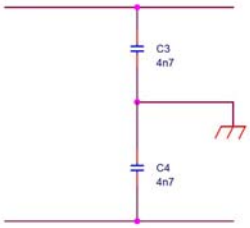


FIGURA 21 – Filtro com 2 capacitores.

7.5. Filtro de linha simplificado

Conforme citado anteriormente, o filtro de linha completo é uma solução eficiente, porém cara em função do custo da estação de solda. Observando-se as emissões conduzidas com carga mínima sem o uso de qualquer filtro (Figura 7(a)), nota-se que em 148,5 kHz (pior caso), o ruído conduzido está cerca de 10 dB acima do nível estabelecido pela norma CISPR 14-1. Analisando-se o diagrama de Bode do filtro completo (Figura 22), pode-se verificar que, em 148,5 kHz, a atenuação deste é de cerca de 50 dB, o que é muito mais do que o necessário.

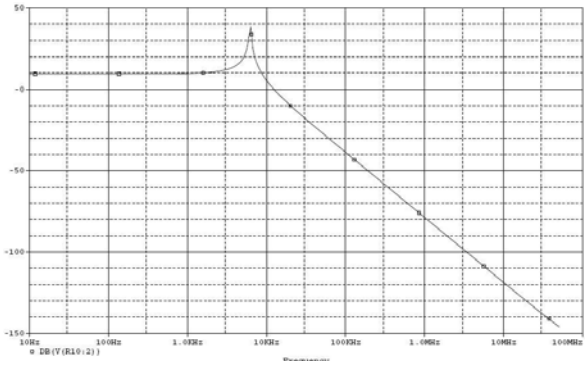
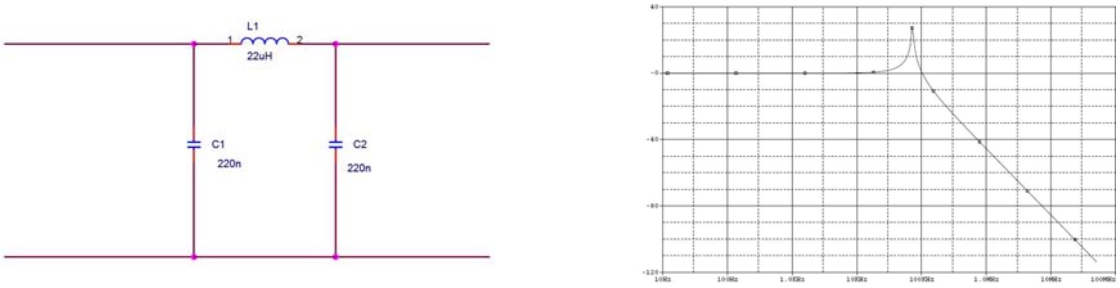


FIGURA 22 – Diagrama de Bode do filtro completo.

A partir destas observações, optou-se pelo projeto de filtros mais simples, atuando apenas no ruído diferencial e com atenuação mais adequada para as necessidades da fonte. A primeira tentativa foi um filtro "pi", apresentado na Figura 23(a). A atenuação em 150 kHz é um pouco maior que 10 dB, conforme o seu diagrama de Bode (Figura 23(b)).



(a) **(b)**

FIGURA 23 – (a) filtro PI e (b) diagrama de bode do filtro PI.

Nos ensaios de emissões conduzidas (as emissões radiadas não foram afetadas), notou-se uma redução além do esperado. A Figura 24 mostra as emissões conduzidas em carga mínima (pior caso).

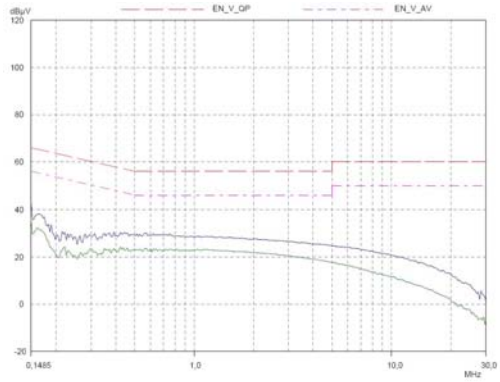


FIGURA 24 – Emissões conduzidas – carga mínima com filtro pi.

Após os ensaios com o filtro "pi", foram realizados testes com um filtro ainda mais simples, denominado filtro RC (Figura 25(a)). O diagrama de Bode do filtro RC (Figura 25(b)) mostra uma atenuação um pouco menor do que 10 dB em 148,5 kHz, mas suficiente para que as emissões conduzidas ficassem dentro da norma CISPR 14-1 (Figuras 26(a), 26(b) e 26(c)).

As emissões radiadas não sofreram alteração em relação ao equipamento sem filtro.

Como este filtro apresenta resistor, houve uma perda de rendimento do ferro de solda. A tensão no ferro de solda (no caso específico do teste, na lâmpada), reduziu em 1%, o que significou uma redução de 2% em termos de potência.

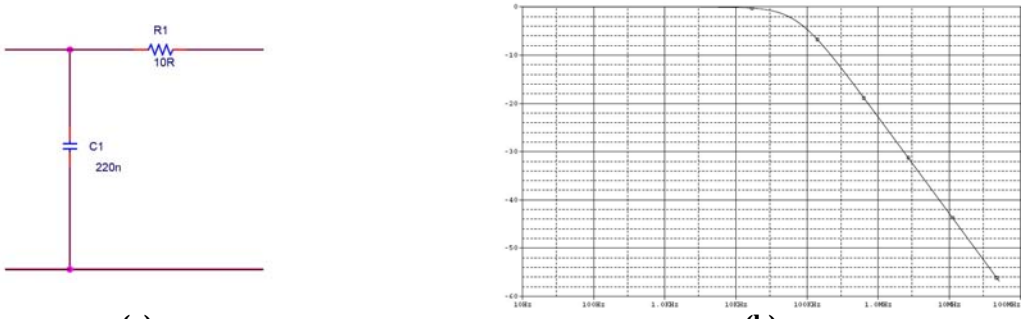
8. CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram apresentados ensaios de uma estação de solda e modificações nela realizadas para se verificar o efeito sobre as emissões conduzidas e radiadas.

A modificação mais atraente em termos de custo e benefícios obtidos foi a inserção de filtro RC na entrada AC, apesar de haver uma pequena degradação de 2% no desempenho do ferro de solda.

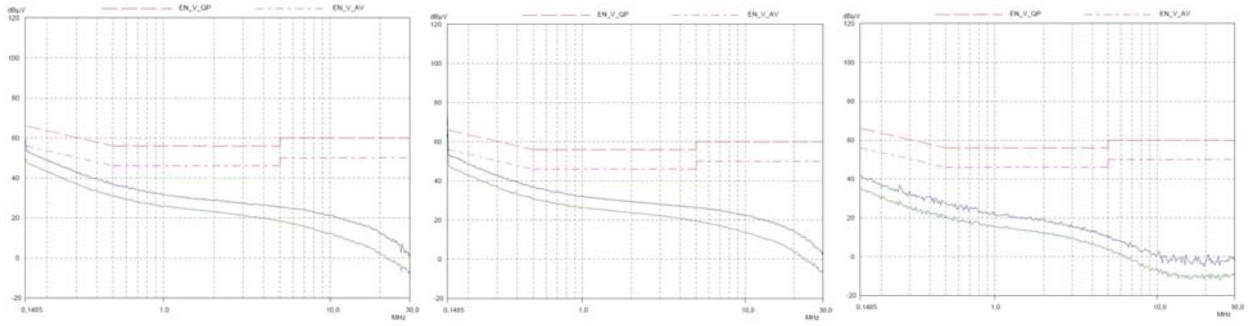
Estudando-se o circuito, chegou-se à conclusão de que o principal causador das emissões conduzidas e radiadas é o chaveamento do TRIAC. Existe a possibilidade de criar um circuito com controle de potência por ciclos inteiros, mas isto descaracterizaria completamente o circuito inicial, tornando inviável a comparação entre eles.

Apesar da importância do assunto compatibilidade eletromagnética, já abordada na introdução deste trabalho, muitos fabricantes ainda não levam o tema a sério. O caso desta estação de solda, que fica muito longe dos padrões impostos pela norma CISPR 14-1, é bem ilustrativo, pois até possui um selo CE.



(a) **(b)**

FIGURA 25 – (a) filtro RC e (b) diagrama de bode do filtro RC.



(a) **(b)** **(c)**

FIGURA 26 – Emissões conduzidas com filtro RC em (a) carga mínima, (b) carga média e (c) carga máxima.

Outra observação que merece destaque durante este trabalho foi o da importância da verificação de várias alternativas para mitigar as radiações conduzidas e radiadas. Nem sempre a mais cara é a melhor. No caso específico da estação de solda, conseguiu-se encontrar uma alternativa bastante interessante do ponto de vista de custo, com resultados bem satisfatórios.

REFERÊNCIAS

MONTROSE, M. I. **Printed circuit board design techniques for EMC compliance**. Nova Iorque: IEEE Press, 1996.

RAIZER, A. **Interferência e compatibilidade eletromagnética**. Transparências, UFSC, set. 2007.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

SISTEMA DE ACIONAMENTO AUTOMÁTICO DE DISPOSITIVOS OU APARELHOS ELETRO-ELETRÔNICOS MICROCONTROLADO

Lucas de Mello Kindermann[1], Everton Luiz Ferret dos Santos[2]

Resumo: A domótica é uma tecnologia que surgiu apresentando soluções para realizar processos de controle e automação nos elementos ou tarefas de uma residência, satisfazendo as necessidades de segurança, conforto e comunicação. Outra vantagem dessa tecnologia é a economia de energia, uma vez que equipamentos eletrônicos podem ser configurados para funcionar em determinadas circunstâncias, permitindo, dessa forma, evitar o desperdício de energia elétrica. Este trabalho visa apresentar o desenvolvimento de um sistema microcontrolado embarcado em um módulo que realize o acionamento de dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos. Para isso, foi investigado o funcionamento do microcontrolador ATmega168, escolhido para essa aplicação, por possuir bons recursos, facilidade de uso e baixo custo, assim como sensores, periféricos e demais componentes eletrônicos, partindo para as etapas de desenvolvimento de *firmware* e *hardware*. O sistema desenvolvido é capaz de controlar até cinco dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos para controle liga/desliga, tendo o acionamento realizado de acordo com as circunstâncias desejadas, seja manualmente, em um horário programado, em uma determinada faixa de temperatura ou a ausência ou presença de luz no ambiente, tudo programado pelo usuário através de uma interface homem-máquina.

Palavras-chave: Domótica. Microcontroladores. Sistemas embarcados. Acionamento automático.

***Abstract**: Domotics is a technology that presents solutions to perform controlling and automation on the elements or tasks of a residence, satisfying the needs of security, comfort and communication. Another advantage of this technology is energy saving, once the electronic equipments can be configured to function on such circumstances that avoid the waste of energy. This article aims to present the development of a microcontrolled embedded system in a module, that activates electro-electronic devices. Therefore, the functioning of ATmega168 was investigated, for pursuing low budget and easy-to-use resources, such as sensors, peripherals and other electronic components, next to stages of firmware and hardware development. The system developed is capable to control until five electro-electronics devices for the on/off control, performing its activation according to desired circumstances such as manually, on a programmed schedule, on a determined range of temperature or with the absence or presence of light on the ambient, all programmed by the user through a human-machine interface.*

***Keywords**: Domotics. Microcontrollers. Embedded system. Automatic actuation.*

[1] Acadêmico do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos do IF-SC <lmkindermann@gmail.com>.
[2] Professor do DAELN, *campus* Florianópolis do IF-SC <everton@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

A domótica, também conhecida como automação residencial ou casa inteligente, é um conjunto de tecnologias que torna possível o gerenciamento e a automatização de diversos dispositivos e aparelhos elétricos ou eletrônicos de uma edificação. Seu objetivo é permitir o controle dos elementos de um ambiente para a realização de tarefas ou serviços domésticos de forma automática, prática e rápida, satisfazendo assim as necessidades de conforto, comunicação, economia e segurança de seus ocupantes e gerando uma melhor qualidade de vida (LEUZENSKI, 2007).

A domótica surgiu nos anos 80, nos paises mais industrializados, com os primeiros sistemas

desenvolvidos aplicados em controle de iluminação, condições climáticas e segurança. Nessa época, surgiu o X-10, o primeiro protocolo criado para permitir a comunicação entre os sensores, atuadores e a central de controle de um sistema de automação residencial (ROQUE, 2008).

Com o desenvolvimento de novas tecnologias de comunicação de dados, radiofrequência, novos protocolos e a criação de componentes eletrônicos cada vez mais poderosos e versáteis, a domótica vem passando por uma grande evolução e aumentando o interesse da população nessa tecnologia, principalmente depois que se tornou possível o acesso remoto ao sistema através de dispositivos como computadores, *palms* e celulares, e as tecnologias sem fio, que permitem a instalação de sistemas de domótica sem que exista a necessidade de alterar drasticamente a instalação elétrica das residências.

No entanto, o alto custo de implementação e a falta de uma padronização e uniformização de protocolos, que permita que equipamentos de diferentes fabricantes possam se comunicar, são fatores que prejudicam o acesso da população a esta tecnologia (CABRAL, 2008).

Quanto ao uso de aparelhos eletro-eletrônicos, o uso irracional destes é um dos fatores que mais contribuem para o desperdício de energia elétrica em uma residência. Devido a uma combinação de maus hábitos e ações, é comum, por exemplo, usuários manterem seus equipamentos eletrônicos ligados quando não existe necessidade.

Buscando resolver estes problemas, este artigo apresenta um sistema de baixo custo que pode ser empregado em automação residencial, trata-se de um sistema de automação para dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos para controle liga/desliga, que permite o acionamento automático em condições: de horário, temperatura ou luminosidade ambiente, programadas pelo usuário.

O sistema visa atender às necessidades dos usuários, buscando oferecer uma solução que resolva os problemas de desperdício de energia elétrica causada pelo uso inadequado de dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos ou a possibilidade de acioná-los sem a necessidade de intervenção direta no equipamento e da presença do usuário no local.

2. PRINCIPAIS COMPONENTES

Esta seção irá apresentar uma breve descrição de alguns dos principais componentes utilizados nesse sistema.

2.1. O microcontrolador ATmega168

O ATmega168 é um microcontrolador de 8 bits fabricado pela Atmel; ele pertence a uma família de controladores de baixo consumo de energia, e com uma boa performance. O ATmega168 possui 16 KB de memória FLASH programável, 1 KB de memória SRAM e 512 B de memória EEPROM (ATMEL, 2009).

O ATmega168 utiliza a arquitetura Harvard estendida, tendo a disposição cerca de 130 instruções, ele é capaz de executar a maioria das instruções em 1 ou 2 ciclos de *clock*, podendo chegar até a 20 MIPs (milhões de instruções por segundo) com uma frequência de processamento de 20 MHz, que é a máxima permitida por este microcontrolador (ATMEL, 2009).

Entre os principais periféricos disponíveis, possui dois temporizadores/contadores de 8 bits e um de 16 bits, conversor A/D de 10 bits disponível em 6 canais multiplexados, 6 canais PWM, contagem precisa de tempo (RTC), comparador analógico, comunicação serial USART (*Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter*), interfaces seriais SPI (*Serial Peripheral Interface*) e TWI (*Two-Wire serial Interface*), 19 fontes de interrupções, sendo duas delas externas, oscilador interno, *watchdog timer* e configurações especiais para os modos de baixo consumo de energia (ATMEL, 2009).

O modelo do ATmega168 utilizado para este projeto (Figura 1) possui 28 pinos, sendo que 23 destes podem ser configurados para I/O (entrada e saída), a alimentação deste microcontrolador deve ser entre 2,7 V e 5,5 V com uma frequência de processamento até 10 MHz ou entre 4,5 V e 5,5 V para até 20 MHz (ATMEL, 2009).

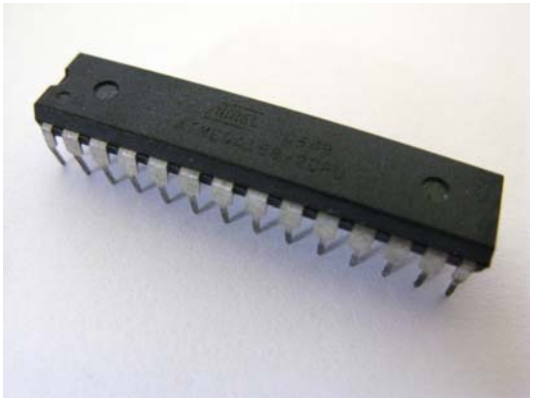


FIGURA 1 – O microcontrolador ATmega168.

Para a programação deste microcontrolador, a Atmel disponibiliza gratuitamente um *software* para o desenvolvimento chamado AVR Studio, no qual os códigos dos programas podem ser desenvolvidos em linguagem Assembly ou em linguagem C, utilizando também o compilador WinAVR (compilador gratuito).

Para a gravação, pode ser utilizado um gravador comercial que seja compatível com este microcontrolador. Com o *hardware* adequado

conectado a um computador, é possível realizar a gravação através do próprio AVR Studio.

Para poder trabalhar com o ATmega168 no desenvolvimento desse sistema, foi utilizado além do próprio microcontrolador e dos programas AVR Studio e WinAVR, um *kit* de desenvolvimento para microcontroladores de 8 bits da linha megaAVR e um gravador USBTinyISP, compatível com o ATmega168 (Figura 2).

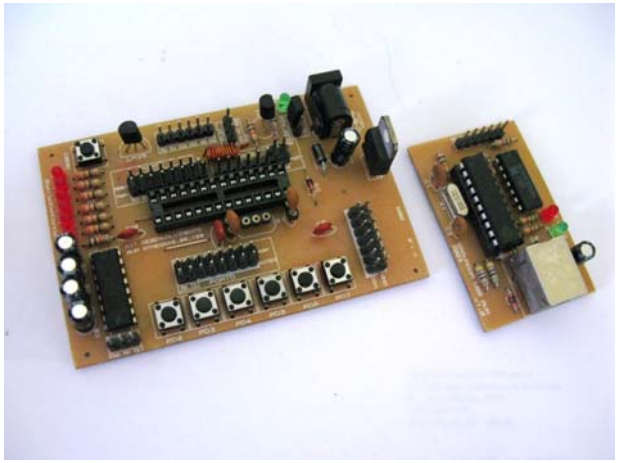


FIGURA 2 – *Kit* de desenvolvimento e gravador compatível com o ATmega168.

2.2. O sensor de temperatura LM35

O LM35 (Figura 3), fabricado pela *National Semiconductor*, é um sensor de temperatura integrado em um chip com encapsulamento TO-92.

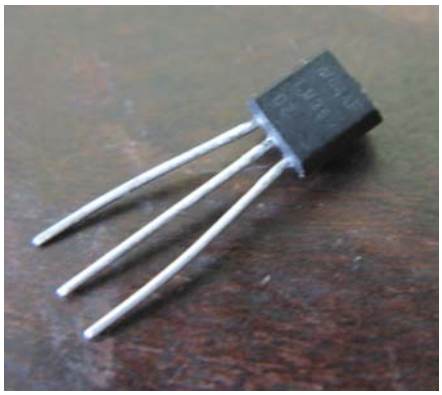


FIGURA 3 – Sensor de temperatura LM35.

Trata-se de um sensor analógico, com precisão linear de 10 mV/°C e que dispensa a necessidade de calibração externa para fornecer uma precisão típica de ±¼ °C em temperatura ambiente e de ±¾ °C sobre toda a faixa de temperatura de funcionamento do sensor, que vai de -55 °C até +150 °C. Sua calibração precisa inerente, baixa impedância e linearidade de saída fazem com que o LM35 tenha uma boa interface com circuitos eletrônicos para a leitura de temperaturas como, por exemplo, um conversor A/D (analógico/digital) (NATIONAL, 2000).

Para o funcionamento, o LM35 deve ser alimentado com uma tensão entre 4 V e 30 V, a corrente drenada pelo sensor é de aproximadamente 60 μA e quando em uso, possui um aquecimento de 0,08 °C ao ar livre, isto é, em temperatura ambiente e sem estar acoplado a qualquer outro material (NATIONAL, 2000).

Este sensor foi escolhido para o projeto pelo fato de ser um sensor de baixo custo e prático. Utilizando o conversor A/D do microcontrolador, é possível realizar a leitura da temperatura ambiente para o sistema e, desta forma, permitir que os aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao módulo possam ser acionados dependendo da temperatura atual do ambiente.

2.3. O relógio de tempo real DS1307

O DS1307 (Figura 4), fabricado pela *Maxim Integrated Products*, é um circuito integrado dedicado para funcionar como um relógio. Utilizando um cristal de 32.768 Hz; ele é capaz de contar precisamente segundos, minutos, dias da semana e do mês, meses e anos.

Para o seu funcionamento, é necessária uma alimentação de 5 V; também é possível ou recomendado que seja utilizada uma bateria de 3,3 V. O DS1307 possui um mecanismo que, em caso de a alimentação principal ser cortada por algum motivo, passa automaticamente a utilizar a energia da bateria como uma alimentação auxiliar, até que a alimentação principal seja restaurada. (MAXIM, 2008).

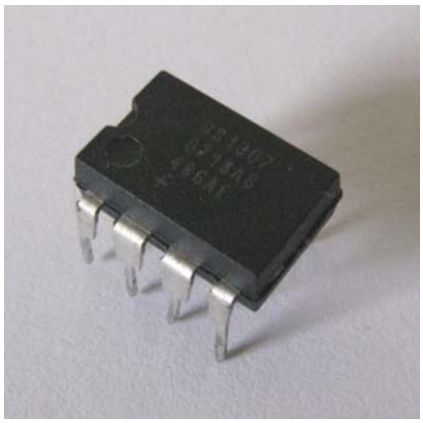


FIGURA 4 – Relógio de tempo real DS1307.

O DS1307 utiliza o protocolo de comunicação I²C ou TWI para transmitir e receber as informações de hora/data para o sistema em que ele estiver sendo empregado. Com uma memória de 56 bytes SRAM, é possível não apenas ler a contagem de hora/data, como também atualizar a informação de hora/data e ajustar o modo de contagem em AM/PM ou 24h (MAXIM, 2008).

O DS1307 possui também um gerador de onda quadrada interno e disponibiliza uma saída para esta função, capaz de transmitir um sinal com frequências de: 32,768 kHz, 8,192 kHz, 4,096 kHz ou 1 Hz (MAXIM, 2008).

Mesmo o ATmega168 possuindo um contador capaz de realizar a contagem em tempo real, optou-se por utilizar o DS1307 pelo fato de este componente já possuir a estrutura de contagem de hora/data pronta, sem haver a necessidade de desenvolver um programa para esta função, poupando, assim, memória no microcontrolador para outras funções tão importantes quanto o relógio. Outro motivo importante de utilizar o DS1307 é devido à capacidade de utilizar a alimentação auxiliar, para o caso de ocorrer algum problema ou imprevisto na alimentação do sistema, este não irá perder as informações de hora/data atuais.

Utilizando o protocolo de comunicação TWI do ATmega168, é possível empregar o DS1307 para trabalhar como um relógio para o sistema, e desta forma, permitir que os aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao módulo possam ser acionados dependendo da hora/data atual.

2.4. O foto-resistor (LDR)

O foto-resistor (Figura 5), também conhecido como LDR (*Light Dependent Resistor*) é um transdutor utilizado para aplicações com detecção de luz. Seu funcionamento está ligado ao fenômeno da fotocondutividade, pelo qual a condutividade de um material varia quando a intensidade da luz que incide sobre ele é alterada (REZENDE, 2004, p.326).

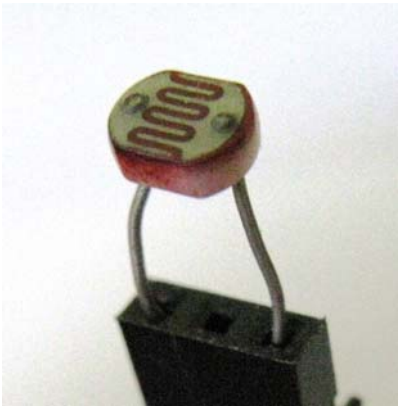


FIGURA 5 – Foto-resistor (LDR).

O LDR é constituído de uma pequena placa de um semicondutor intrínseco, com uma dopagem muito pequena, que torna o material sensível à luz incidente sobre ele, e, desta forma, alterando o valor da sua resistência (REZENDE, 2004, p.326).

Quando uma luz muito forte incide sobre o LDR, a sua resistência é mínima, chegando a algo próximo dos 100 Ω; do contrário, quando o LDR está exposto à escuridão total, a sua resistência é máxima, algo próximo de 1 MΩ.

Aplicando o LDR em um circuito eletrônico com divisor de tensão, é possível obter, ao invés de uma resistência, uma tensão variável. Desta forma, é possível utilizar um LDR com o comparador analógico do ATmega168, permitindo que os dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao módulo possam ser acionados dependendo da incidência luminosa presente no ambiente.

3. O SISTEMA

Para o desenvolvimento desse sistema, o projeto foi executado em etapas, procurando avançar para a etapa seguinte somente após a conclusão da etapa atual.

As etapas desenvolvidas foram: estudo e planejamento, desenvolvimento do *firmware*, realização de testes, desenvolvimento do *hardware*, prototipagem e testes finais. Esta seção irá apresentar a metodologia aplicada nas etapas de planejamento e desenvolvimento do sistema. Na Figura 6, pode ser visto o diagrama de blocos do sistema.

3.1. Planejamento e característica do sistema

A primeira etapa de execução desse projeto foi realizar um planejamento de como seria o funcionamento deste sistema, procurando encontrar a melhor maneira de responder a perguntas como: Quantos aparelhos serão controlados? Quais as formas de acionamento? Configurações? Quais componentes eletrônicos serão utilizados? Como o programa deve se comportar?... Entre outras perguntas.

Durante a etapa de planejamento, foram levantadas algumas características para o sistema, definindo detalhes de como o sistema deve se comportar, quais funções ele deve ser capaz de realizar e suas limitações.

Entre as principais características planejadas e, posteriormente, aplicadas no protótipo do módulo, podem ser citadas:

- Realizar o acionamento automático, programado pelo usuário, de acordo com as condições de hora/data, temperatura e luminosidade ambiente desejadas.
- Interface homem-máquina realizada através de um painel de controle e com navegação em uma estrutura de menus.
- 36 configurações possíveis de acionamento para até cinco dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos, permitindo distintas configurações para cada um deles.
- As configurações de acionamento permanecem armazenadas na memória do sistema, mesmo quando estiver desligado.
- Monitoramento constante do horário, temperatura e luminosidade atual do ambiente.

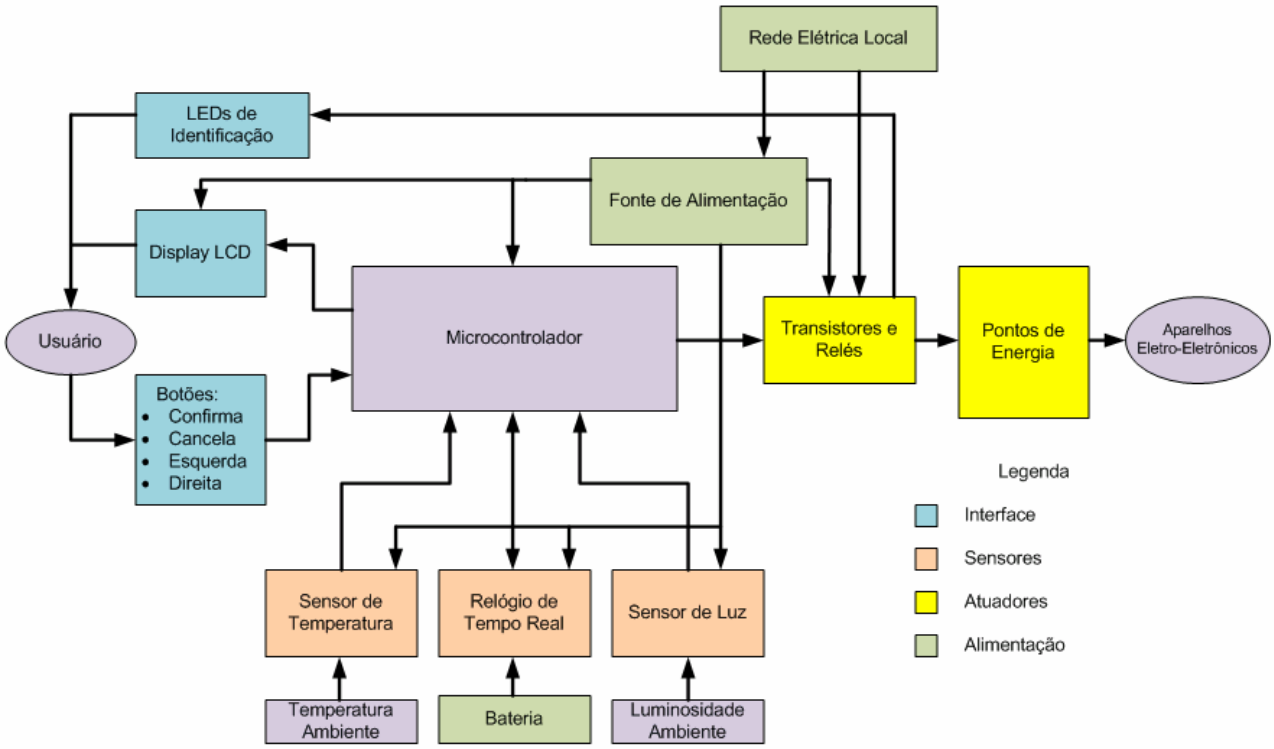


FIGURA 6 – Diagrama de blocos do sistema.

- O relógio continua funcionando mesmo com o sistema desligado, sem perder a sua configuração.
- O módulo foi projetado para ser alimentado e para acionar dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos que sejam normalmente conectados a rede elétrica de 220 V/60 Hz.
- A capacidade máxima de potência que o módulo suporta é de 1.300 W por dispositivo ou aparelho eletro-eletrônico conectado.

3.2. Desenvolvimento do *firmware*

Com as características do sistema definidas e com a aquisição de todos os componentes e ferramentas necessárias para a realização do projeto, a segunda etapa do projeto foi trabalhar no desenvolvimento do *firmware* do microcontrolador.

Basicamente, o *firmware* é um código, contendo um conjunto de instruções operacionais, que é gravado diretamente em um circuito integrado e implementado no *hardware* de um equipamento eletrônico.

Neste projeto, o *firmware* será responsável pelo processamento das informações do sistema, realizando o monitoramento dos sensores, a comunicação com o usuário através de uma interface homem-máquina e a atuação nos aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao módulo.

Para o desenvolvimento do *firmware*, foi utilizada a linguagem C. Para realizar a programação do código, foi utilizado o programa AVR Studio, e para a compilação do código no microcontrolador, foi utilizado o programa WinAVR em conjunto com o AVR Studio.

A programação foi realizada por partes; foram desenvolvidos códigos separados para cada componente ou periférico do sistema. Para cada código desenvolvido, foram realizados testes com simulações via *software*, utilizando o programa PROTEUS – ISIS.

A ordem dos componentes programados foi: a tela LCD, o relógio de tempo real DS1307, o sensor de temperatura LM35, o foto-resistor, o circuito de acionamento e a interface homem-máquina do sistema.

Para cada um desses componentes, foi necessário utilizar algum periférico ou recurso do microcontrolador ATmega168. Entre os periféricos e recursos utilizados estão:

a) *Two-Wire Interface*: Utilizado para realizar a comunicação entre o microcontrolador ATmega168 e o relógio de tempo real DS1307.
b) Conversor analógico/digital: Utilizado para realizar a leitura da temperatura do sensor LM35.
c) Comparador analógico: Utilizado para comparar o valor da tensão do foto-resistor

com o valor da tensão de referência ajustado pelo usuário.

d) Interrupção por temporizador: Utilizado para acessar a rotina de verificação das configurações programadas pelo usuário.
e) Memória EEPROM: Utilizado para armazenar as configurações realizadas pelo usuário na memória do sistema. Esta memória é atualizada sempre que uma nova configuração é realizada pelo usuário, e carregada na inicialização do sistema.
f) Oscilador interno de 8 MHz: Foi utilizado o *clock* interno do microcontrolador para o processamento do sistema.
g) Pinos de entrada/saída: Utilizados para a interface homem-máquina e para o circuito de acionamento.

No final, todas as partes foram reunidas para o desenvolvimento da versão definitiva do *firmware*. Nesse momento, foi desenvolvida a rotina responsável pela verificação das configurações programadas pelo usuário através da interface homem-máquina para realizar o processo de acionamento nos aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao módulo.

3.2.1. Interface homem-máquina

Para realizar a comunicação entre o usuário e o sistema, optou-se por desenvolver uma interface homem-máquina utilizando um painel de controle, formado por uma tela LCD de 16x2 caracteres e quatro botões *push-button*.

Foi desenvolvido no *firmware* uma série de funções e rotinas para tornar esta interface possível, criando uma estrutura de menus para o sistema, permitindo, assim, que o usuário possa realizar as configurações de acionamento para os aparelhos conectados ao módulo.

No desenvolvimento da interface do sistema com o usuário, além da estrutura de menus, foi criada uma tela padrão que é exibida enquanto o sistema permanece ligado, informando ao usuário a hora/data e temperatura atual e a presença/ausência de luz no ambiente. Também foi criada uma tela de estado do sistema que permite ao usuário saber quais pontos de energia estão programados para realizar o acionamento automático e um código, indicando qual é a forma de acionamento programada para cada ponto de energia.

Foram designadas, para cada botão do painel de controle, funções distintas, que permitem ao usuário navegar nos menus do sistema. Os nomes definidos para os quatro botões são: Confirma, Cancela, Esquerda e Direita. Abaixo segue uma descrição das funções de cada botão.

- **Confirma**: permite o usuário acessar o menu principal, confirmar uma opção escolhida ou acessar o próximo menu.
- **Cancela**: permite o usuário acessar a tela de estado do sistema ou cancelar uma opção, retornando ao menu anterior.
- **Esquerda e Direita**: Realizam a navegação dentro dos menus do sistema ou são utilizados para ajustar valores de hora, data ou temperatura.

Para facilitar o entendimento da interface e do funcionamento do sistema, pode ser visto, na Figura 7, um diagrama de blocos, demonstrando em forma de mapa, a interface do sistema.

3.2.2. Funcionamento do sistema

Quando o menu principal é acessado, o usuário pode escolher qual ponto de energia ou tomada deseja configurar. O usuário poderá escolher um dos cinco pontos de energia disponíveis no módulo. O menu principal também oferece a opção para configurar a hora/data atual.

Após selecionar o ponto de energia, o menu de ativação é acessado, permitindo ao usuário escolher qual o modo de acionamento ele deseja configurar para o ponto de energia escolhido. As opções disponíveis são: “ativar por relógio”, “ativar por temperatura”, “ativar por luminosidade”, “apenas ativar”, “apenas desativar” (acionamento manual) e “limpar programa” (permite remover uma configuração anteriormente armazenada para o ponto de energia escolhido pelo usuário).

O menu de opções varia de acordo com o modo de acionamento escolhido, se foi escolhido o modo de acionamento por relógio, as opções disponíveis são: “ligar”, “desligar”, “ligar e desligar” ou “desligar e ligar”. Se for escolhido o modo de acionamento por temperatura ou luminosidade, as opções disponíveis são: “desligar <> ligar” e “ligar <> desligar”, onde o símbolo “<>” representa se o ponto de energia vai ser ativado ou desativado acima ou abaixo da temperatura limite ou com a ausência/presença de luz no ambiente.

Se o modo escolhido foi por relógio, o usuário irá ajustar o horário de acionamento; se o modo escolhido foi por temperatura, o usuário irá ajustar a temperatura limite e, depois de confirmar, o sistema irá gravar a configuração na memória. Se o modo escolhido foi por luminosidade, o sistema irá diretamente gravar a configuração na memória.

Por fim, se o modo escolhido foi por relógio, após ajustar o(s) horário(s), o menu de dias é acessado, permitindo ao usuário escolher os dias que ele deseja que o ponto de energia seja acionado.

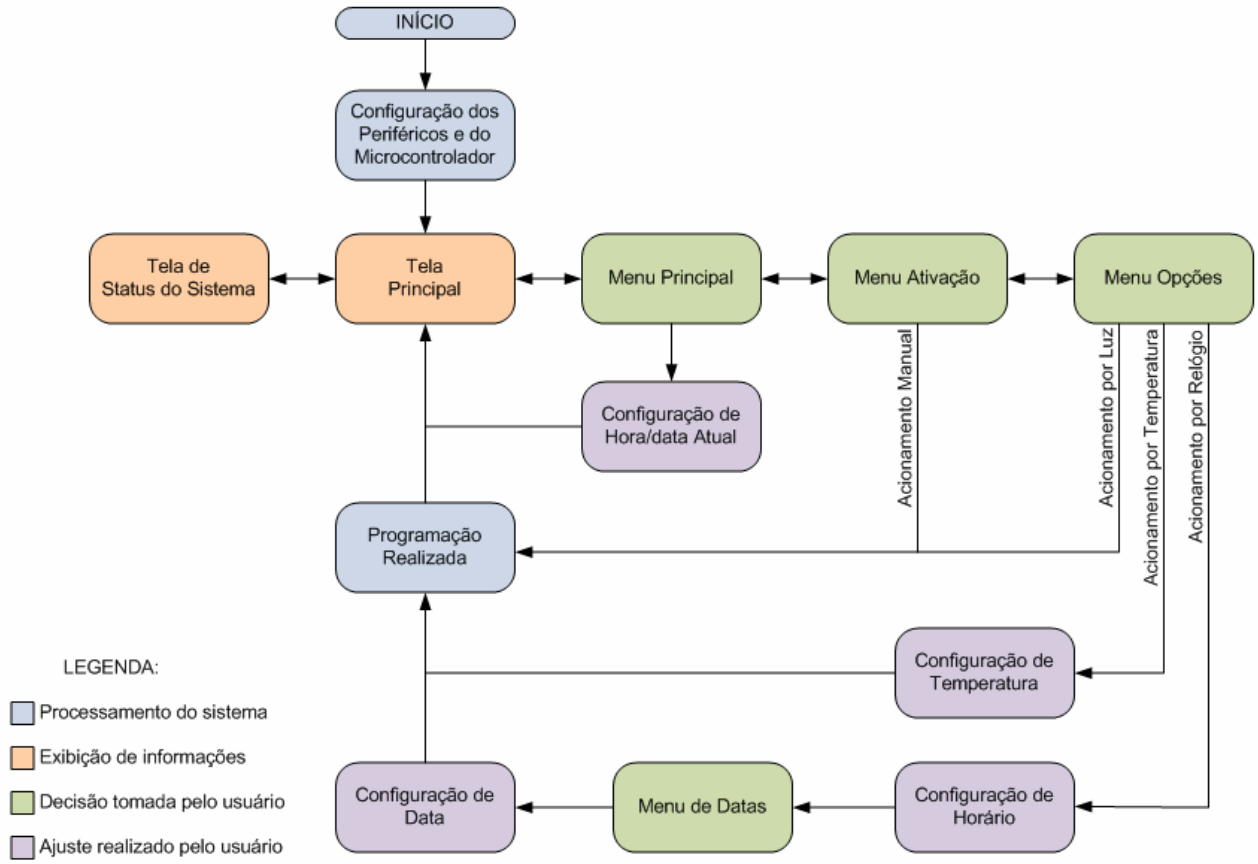


FIGURA 7 – Diagrama de blocos da interface.

As opções disponíveis são: “somente 1x”, “1x por semana”, “dias de semana”, “finais de semana”, “a cada dois dias”, “a cada três dias”, “definir qtde de dias” e “todos os dias”.

Dependendo da escolha realizada, o sistema irá solicitar que o usuário ajuste a data desejada antes de gravar a configuração na memória.

Enquanto o sistema permanecer ligado, constantemente o sistema irá realizar o monitoramento da hora/data, temperatura e luminosidade atual, e também realizar a verificação das configurações programadas pelo usuário, realizando o processo de acionamento toda vez que a condição imposta ao sistema for atendida.

3.3. Desenvolvimento do *hardware*

Com o *firmware* do sistema desenvolvido, com todos os componentes e periféricos funcionando em conjunto e testado via *software* através de programas de simulação, o projeto parte agora para a etapa de desenvolvimento do *hardware*.

Assim como o *firmware*, o *hardware* do sistema também foi projetado em partes; inicialmente foi desenvolvido um diagrama esquemático para cada componente do sistema, seguindo as orientações apresentadas nas folhas de dados. Para desenvolver esses diagramas, foi utilizado o programa PROTEUS – ISIS[1], o mesmo utilizado para as simulações do *firmware*.

Para cada diagrama esquemático desenvolvido, foi montado o circuito eletrônico correspondente em uma matriz de contatos para a realização de testes, cuja finalidade era verificar o funcionamento do componente e do próprio circuito eletrônico. Aproveitando a realização desses testes, também foi verificado o funcionamento dos códigos programados no ATmega168 para cada componente. Para realizar estes testes, foi utilizado o *kit* de desenvolvimento do microcontrolador, conectado ao circuito eletrônico do componente testado na matriz de contatos.

Após desenvolver e testar todos os circuitos eletrônicos, todas as partes foram reunidas para formar o diagrama esquemático do módulo, conforme pode ser visto na Figura 8.

Da mesma forma que os demais diagramas, foi realizada a montagem do circuito do módulo em matriz de contato e, utilizando o *kit* de desenvolvimento, foram realizados testes com o sistema completo aplicado no *hardware*.

[1] Disponível em http://www.labcenter.co.uk/.

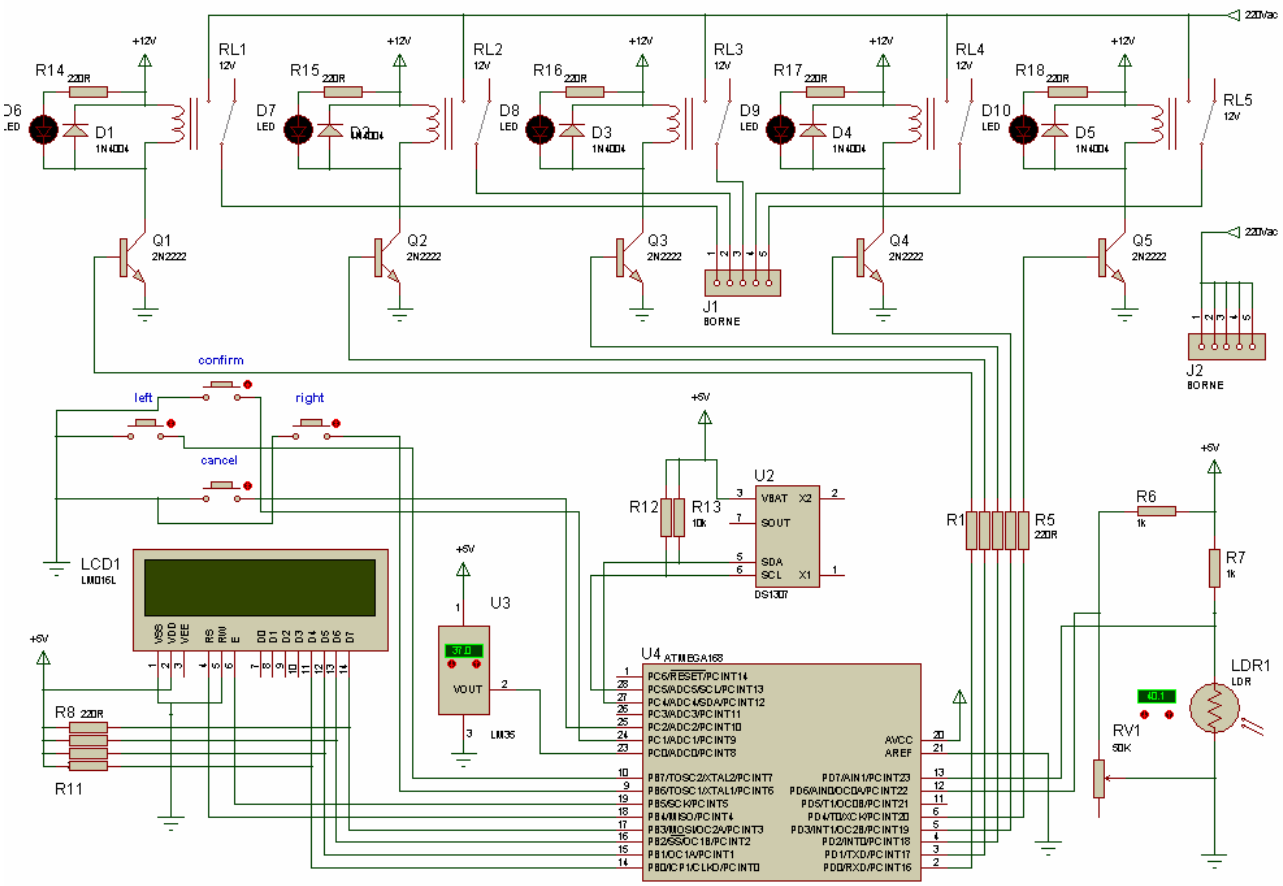


FIGURA 8 – Diagrama esquemático do *hardware*.

3.3.1. Fonte de alimentação

Para o funcionamento dos componentes eletrônicos do módulo, é necessária uma alimentação com tensões de 5 V e 12 V. Como se trata de um sistema que irá controlar alguns pontos de energia da rede elétrica para o acionamento de aparelhos eletro-eletrônicos, nada melhor do que aproveitar a própria rede elétrica para obter a energia necessária para o funcionamento do sistema.

Para isso, foi desenvolvido um circuito de alimentação para o módulo. A Figura 9 apresenta o diagrama esquemático do circuito de alimentação utilizado.

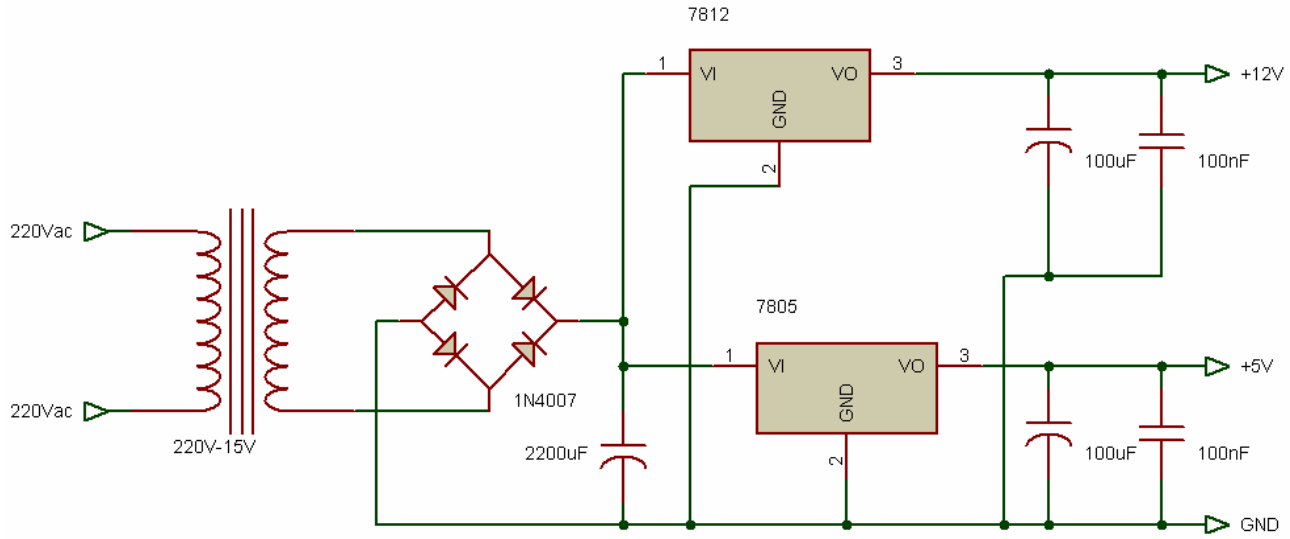


FIGURA 9 – Diagrama esquemático da fonte de alimentação.

O transformador reduz a tensão alternada da rede elétrica para 15 V, a ponte de diodos é responsável pela retificação do sinal. O capacitor de 2.200 µF diminui bastante a variação da tensão retificada, mantendo um valor médio de tensão para a alimentação dos reguladores de tensão KA7805 e KA7812 (FAIRCHILD, 2001), responsáveis por fornecer as tensões desejadas de saída.

Por fim, os capacitores de 100 µF e 100 nF são utilizados para filtrar os sinais de saída, evitando ruídos de alta frequência. Devido ao aquecimento gerado, foram acoplados dissipadores nos reguladores de tensão para evitar a queima desses componentes (BOYLESTAD, 2005).

3.3.2. Circuito de acionamento

O circuito de acionamento é o responsável por realizar a atuação do sistema nos aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao módulo, através do controle dos pontos de energia ou tomadas. O circuito é composto de um transistor MPS2222A, um diodo 1N4007, um relé RAS-1210 (SUNHOLD, 2010) e um conjunto de resistor e LED de identificação para cada ponto de energia a ser controlado que, no caso deste projeto, serão cinco pontos de energia.

O RAS-1210 é um relé que permite o acionamento de cargas de 220 V e corrente de até 7 A, o que limita a potência do aparelho conectado ao módulo para até 1.300 W. O diodo 1N4007 é utilizado para a proteção do transistor.

O circuito recebe o sinal do microcontrolador, correspondente ao ponto de energia que deve ser acionado. Quando o sinal enviado possui o nível lógico 1 (ou 5 V), o terminal da base do transistor é energizado e este realiza o chaveamento do circuito de acionamento, fechando a malha do circuito e alimentando o relé. Com a bobina do relé energizada, o campo eletro-magnético gerado por ela realiza o chaveamento da rede elétrica nesse ponto de energia, ativando o aparelho ou dispositivo eletro-eletrônico conectado ao módulo (BOYLESTAD, 2005).

Quando o sinal enviado pelo microcontrolador possui o nível lógico 0, não há tensão na base do transistor e, por isso, o circuito de acionamento permanece aberto para esse ponto de energia, mantendo o aparelho ou dispositivo eletro-eletrônico conectado ao módulo desativado (BOYLESTAD, 2005).

Para cada ponto de energia, o módulo utiliza um LED para identificar o acionamento. Quando o ponto de energia for ativado, o LED irá acender e permanecerá ligado até que o ponto seja desativado ou o sistema seja desligado. O inverso ocorre quando o ponto de energia for desativado. Por medida de segurança, o sistema sempre será inicializado com todos os pontos de energia desativados, até que as circunstâncias programadas para o acionamento dos pontos de energia sejam atendidas.

3.3.3. Placa de circuito impresso

Com o circuito eletrônico do módulo desenvolvido, foi utilizado o programa PROTEUS – ARES[2] para desenvolver o *layout* da placa de circuito impresso do módulo. O *layout* pode ser visto na Figura 10.

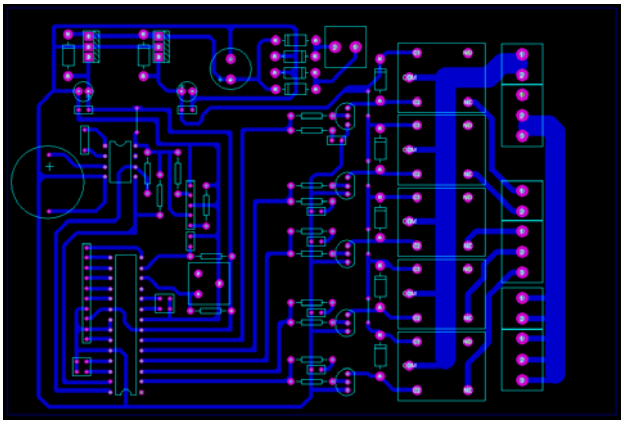


FIGURA 10 – *Layout* da placa do módulo.

A placa de circuito impresso foi projetada visando integrar toda a arquitetura do módulo em uma única placa, o circuito foi dividido em três blocos: circuito de acionamento, circuito de alimentação e o circuito principal, este último contendo as ligações do microcontrolador com os periféricos, sensores e painel de controle para a interface do sistema.

Estas ligações são realizadas através de cabos que realizam as conexões dos componentes com os pinos na placa de circuito impresso. A exceção é para o DS1307 que é interligado diretamente ao microcontrolador através das trilhas da placa, e aos circuitos divisores de tensão, que são utilizados para obter a tensão gerada pelo sensor de luz e a tensão que serve como referência para o comparador analógico do ATmega168 realizar a detecção de luz.

Depois de concluído o *layout*, a placa foi criada utilizando uma fresadora e, em seguida, foi realizada a soldagem dos componentes. Na Figura 11, pode ser visto o *hardware* do módulo completamente desenvolvido, com todos os componentes soldados na placa. A versão definitiva do *firmware* foi gravada no microcontrolador e esse foi incorporado ao *hardware*, obtendo, desta forma, o protótipo do sistema.

4. TESTES DO PROTÓTIPO

Com o protótipo funcional desenvolvido e o sistema totalmente integrado ao módulo, foram

[2] Disponível em http://www.labcenter.co.uk/.

realizados testes para verificar o funcionamento completo do sistema e analisar o seu comportamento elétrico.

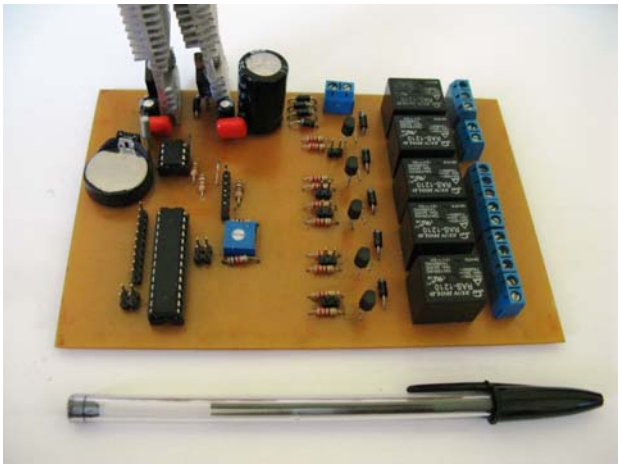


FIGURA 11 – Foto do módulo do sistema.

Esses testes foram realizados com o protótipo ligado diretamente na rede elétrica 220 V/60 Hz; todos os periféricos e componentes externos foram conectados ao módulo, entre eles o transformador, sensores, LEDs, botões e tela LCD. Os testes foram realizados em uma bancada, tomando os cuidados devidos para evitar qualquer tipo de acidente na hora de realizar os testes com os aparelhos eletro-eletrônicos.

Ao ser ligado pela primeira vez, o sistema apresentou a tela principal no LCD, exibindo os valores de hora/data inicial (01/01/00 e 00:00:00), temperatura ambiente e a detecção da presença de luz do ambiente. Todas as medições apresentaram um bom funcionamento, com o horário sendo atualizado a cada segundo e a detecção de luz e a temperatura sendo atualizada aproximadamente a cada 5 segundos. Na Figura 12 pode ser vista a tela principal do sistema sendo exibida pela tela LCD.

FIGURA 12 – Tela principal do sistema.

O primeiro teste realizado foi com a interface homem-máquina desenvolvida para o protótipo; foi possível realizar os acionamentos de cada ponto de energia de forma manual ou programar o módulo para realizar os acionamentos de forma automática. Também foi possível ajustar a hora/data atual e verificar a programação atual de cada ponto de energia do módulo, através da tela de estado do sistema.

Na tela de estado (Figura 13), é exibido um número entre colchetes, relacionado a cada ponto de energia (ou tomada) do sistema. Esses números representam a forma de acionamento automático programado pelo usuário.

FIGURA 13 – Tela de estado do sistema.

O significado dos números exibidos para cada ponto de energia pode ser visto na Tabela 1.

TABELA 1 – Estados do sistema.

Número	Significado
1	Não há programa configurado.
2	Acionamento por relógio: ligar.
3	Acionamento por relógio: desligar.
4	Acionamento por relógio: desligar, depois ligar.
5	Acionamento por temperatura: ligar acima do limite estabelecido.
6	Acionamento por temperatura: ligar abaixo do limite estabelecido.
7	Acionamento por luminosidade: ligar com a presença de luz
8	Acionamento por luminosidade: ligar com a ausência de luz.

Aproveitando o momento, foi realizada a medição da corrente elétrica que o módulo consome durante o seu funcionamento. Foi utilizado um multímetro digital, conectado em série com um dos condutores que faz a ligação do módulo com a rede elétrica. Nenhum equipamento foi conectado nas saídas dos pontos de energia do módulo, sendo assim, o valor medido é relacionado somente com o consumo de energia dos componentes e periféricos do sistema. Foi utilizado o acionamento manual de cada ponto de energia para obter os valores de corrente elétrica, conforme podem ser vistos na Tabela 2.

TABELA 2 – Valores de corrente elétrica consumida pelo sistema.

Condição do sistema	Corrente elétrica consumida
Nenhum ponto de energia ativado.	46,5 mA
Com 1 ponto de energia ativado.	51,1 mA
Com 2 pontos de energia ativados.	55,2 mA
Com 3 pontos de energia ativados.	59,7 mA
Com 4 pontos de energia ativados.	64 mA
Com 5 pontos de energia ativados.	68,2 mA

A esses valores, é somado o total da corrente elétrica consumida pelos aparelhos eletro-eletrônicos conectados ao módulo quando ativados. No desenvolvimento do *hardware*, devido à capacidade dos componentes utilizados, foi definido o limite máximo de 7 A para um único ponto de energia, e de 10 A para todo o sistema.

Para a realização dos testes de acionamento, foi utilizado como aparelho eletro-eletrônico uma luminária com uma lâmpada fluorescente de 9 W (com 220 V e consumo de aproximadamente 30 mA), conectado no primeiro ponto de energia do módulo. Na Figura 14, pode ser visto o sistema ligado com o protótipo preparado para a realização dos testes. A seguir, uma descrição dos testes realizados para cada forma de acionamento automático do sistema é fornecida.

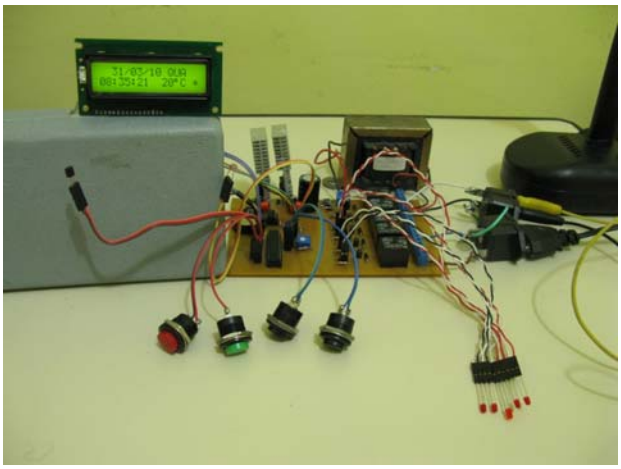


FIGURA 14 – Protótipo em funcionamento para a realização de testes.

4.1. Acionamento do relógio

Primeiramente foi analisado o funcionamento do relógio de tempo-real DS1307 integrado ao sistema. Antes de ligar o protótipo pela primeira vez, foi empregado ao sistema uma bateria de lítio de 3 V e um cristal de 32,768 kHz. Ao ligar pela primeira vez, foi apresentado o valor inicial de hora/data do DS1307, iniciando a contagem e com o horário sendo atualizado a cada segundo. Com a interface, o menu de configuração de horário foi acessado e os valores atuais foram ajustados (exceto os segundos, todos os outros valores são definidos pelo usuário); confirmando os valores ajustados, o sistema gravou a hora/data atual com sucesso, voltando a tela inicial após 5 segundos e seguindo com a exibição da contagem.

O relógio manteve sua sincronia durante todo o período em que o sistema permaneceu ligado, seja na tela principal, exibindo os valores atuais, ou quando era realizada a navegação nos menus do sistema. Também foram realizados testes com o desligamento temporário do sistema; os resultados foram positivos, não houve perda dos valores ajustados e o sistema manteve a contagem de hora/data sem perder a sincronia.

O sistema desenvolvido disponibiliza um total de 32 combinações possíveis de acionamento por hora/data, atuando sobre um determinado ponto de energia através das seguintes ações: “Ligar”, “Desligar”, “Primeiro ligar, depois desligar” e “Primeiro desligar, depois ligar”. Valores de horas e minutos devem ser ajustados para cada ação e dependendo da combinação escolhida, valores de dia da semana ou dia do mês também devem ser ajustados.

Foram realizados testes com todas as combinações disponíveis, uma de cada vez. O sistema atuou sobre o ponto de energia em que a luminária estava conectada, ligando-a ou desligando-a, da forma como foi programada quando as condições especificadas eram atendidas (Figura 15).

FIGURA 15 – Sistema ativando uma luminária através do acionamento por relógio.

O sistema executa a rotina de verificação das configurações programadas a cada 5 segundos; nessa rotina, ele verifica a hora/data atual com a hora/data programada para cada ponto de energia e,

quando os valores são iguais, o sistema realiza o processo de acionamento. Essa rotina é sempre executada enquanto o sistema estiver ligado, independente da tela ou do menu que estiver sendo exibido ou acessado.

4.2. Acionamento por temperatura

Existem duas combinações possíveis para o acionamento por temperatura: ligar quando a temperatura estiver acima do limite e desligar quando estiver abaixo, ou o inverso, ligar quando estiver abaixo do limite e desligar quando estiver acima. O acionamento ocorre quando a temperatura atual ultrapassa a temperatura limite especificada pelo usuário.

O sistema executa a rotina de verificação das configurações programadas, verificando a temperatura ambiente atual e comparando com a temperatura limite. O sistema realizará o acionamento quando a temperatura limite for ultrapassada em 1 °C, e irá manter o ponto de energia no estado programado até que a temperatura ambiente volte a ficar dentro do limite e com 3 °C de distância da temperatura limite, quando o sistema desfaz o acionamento programado até que a temperatura limite seja ultrapassada novamente.

Para realizar o teste de acionamento por temperatura, foi utilizada a temperatura ambiente e a temperatura dissipada pelo regulador KA7805 para obter a variação de temperatura necessária para realizar os acionamentos. No momento do teste, a temperatura ambiente era de 22 °C e a do dissipador do KA7805 era de 55 °C.

Para o primeiro caso, o ponto de energia foi programado para ligar quando a temperatura do sensor estiver acima de 27 °C (temperatura limite especificada). Fixando o sensor no dissipador, a temperatura subiu e quando o sistema realizou a leitura de 28 °C, ativou a luminária conectada ao ponto de energia programado. Após retirar o sensor do dissipador, a temperatura voltou a cair e quando chegou em 24 °C, o sistema desativou a luminária.

Para o segundo caso, o ponto de energia foi programado para ligar a luminária com a temperatura abaixo de 25 °C (temperatura limite). Com o sensor na temperatura ambiente de 22 °C, após realizar a programação, o sistema ativou a luminária. Fixando novamente o sensor no dissipador, a temperatura começou a subir e ao atingir 28 °C, o sistema desativou a luminária. Retirando novamente o sensor do dissipador, a luminária foi ativada novamente quando a temperatura alcançou 24 °C.

4.3. Acionamento por luminosidade

O circuito responsável pela detecção de luz utiliza dois divisores de tensão, alimentados com 5 V e composto por um resistor de 1 kΩ e resistências variáveis: uma delas é o foto-resistor LDR, e a outra resistência é um trimpot de 50 kΩ que é ajustado pelo usuário. Esse ajuste é realizado para obter a tensão de referência, para que o microcontrolador possa compará-la com a tensão gerada pela variação de luminosidade do LDR. Quando a tensão no LDR é maior que a tensão no trimpot, o sistema detecta a ausência de luz, quando a tensão no LDR é menor que a tensão no trimpot, o sistema detecta a presença de luz.

Para realizar o acionamento por luminosidade, o trimpot deverá ser regulado de maneira diferente para cada fonte de luz, de modo que o sistema possa interpretar a presença/ausência de luz, estabelecendo um limite que separe as duas condições. Quanto menor for a distância entre a posição do trimpot e o limite, mais sensível será a detecção de luz realizada pelo sistema. Existem duas combinações possíveis para o acionamento por luminosidade: ativar o ponto de energia com a presença de luz e desativá-lo com a ausência, e vice-versa.

No teste realizado, o LDR foi instalado no lado externo de uma residência para captar diretamente a luz do sol. O trimpot foi regulado de maneira que fosse capaz de detectar a luz do sol no fim de tarde com bastante sensibilidade, para que no momento em que o céu estiver praticamente escuro, seja possível detectar a ausência de luz.

Para adquirir o valor da resistência, essa foi medida em um pino aberto do trimpot; com a referência do mesmo, por se tratar de um trimpot linear, bastava subtrair o valor adquirido do valor total do componente para obter a resistência utilizada para este teste. Aplicando esse método, chegou-se ao valor de 18 kΩ; com o sistema ligado, a tensão sobre o trimpot foi de 4,67 V.

Para o primeiro teste de acionamento, o ponto de energia em que a luminária estava conectada foi programado para ligar com a presença de luz. Esse teste foi realizado no início do período matutino; a luminária permaneceu desligada até as 6 horas e 54 minutos, quando o acionamento foi realizado, ligando a luminária conectada ao módulo.

Para o segundo teste, o mesmo ponto de energia foi programado para ligar com a ausência de luz. Esse teste foi realizado no final do período vespertino do mesmo dia do primeiro teste e, com o mesmo valor de resistência do trimpot, a luminária permaneceu desligada até as 17 horas e 22 minutos, quando o acionamento foi realizado, ligando a luminária conectada ao módulo.

4.4. Testes de potência

Diversos aparelhos eletro-eletrônicos foram utilizados para realizar os testes do sistema. Antes

de aplicá-los, foi realizada a medição do consumo de corrente elétrica em cada aparelho, através do uso de um multímetro. Na Tabela 3 pode ser vista a relação dos aparelhos utilizados e o consumo de corrente elétrica gerado por eles; todos esses aparelhos funcionaram normalmente ao serem ativados pelo sistema.

TABELA 3 – Valores de corrente elétrica dos aparelhos eletro-eletrônicos testados.

Aparelho eletro-eletrônico	Corrente média	Corrente de pico
Lumiária	30 mA	33 mA
Ventilador (velocidade máxima)	400 mA	5 A
Liquidificador (velocidade máxima)	850 mA	3,63 A
Sanduicheira elétrica	2,9 A	2,9 A
Grelhador elétrico	5,3 A	5,3 A
Aspirador de pó	5,4 A	6,8 A
Ferro de passar	4,54 A	4,54 A

Utilizando esses aparelhos, foram realizados testes para verificar o funcionamento do sistema com as condições máximas de corrente elétrica estabelecida para os pontos de energia e para o módulo do sistema.

Para analisar o funcionamento do sistema com 7 A em um único ponto de energia, foram acionados um ferro de passar e uma sanduicheira elétrica. Utilizando um multímetro digital para medir a corrente no sistema, o ponto de energia foi ativado, obtendo na leitura um consumo de 7,2 A. Mesmo ultrapassando um pouco o limite estabelecido, os aparelhos mantiveram pleno funcionamento, embora o uso prolongado de qualquer dispositivo ou aparelho eletro-eletrônico com um consumo de corrente superior a 7 A poderá diminuir a vida útil ou mesmo danificar os componentes do circuito de acionamento para o respectivo ponto de energia do sistema. Na Figura 16, pode ser visto o protótipo durante a realização desse teste.

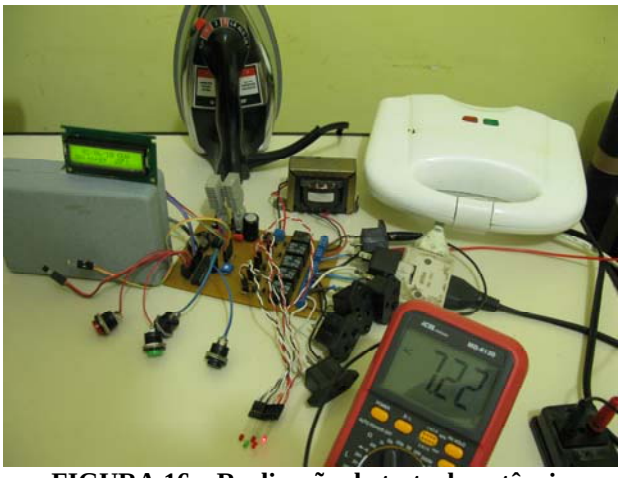


FIGURA 16 – Realização do teste de potência de um ponto de energia.

O limite para esse protótipo foi estabelecido em 10 A a fim de evitar a necessidade de realizar uma instalação elétrica específica para a realização dos testes. Alterando a largura das trilhas que fornecem alimentação aos pontos de energia e selecionando componentes com maior capacidade de corrente, é possível desenvolver um novo protótipo para o acionamento de dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos mais potentes.

5. MELHORIAS PROPOSTAS

Partindo deste projeto, é possível implementar algumas melhorias para o sistema desenvolvido, podendo tornar alvo de um trabalho futuro. Justamente pelo fato da domótica (ou automação residencial) ser formada por um conjunto de tecnologias, diversas dessas podem ser integradas para desenvolver sistemas que atendam às necessidades do usuário, ao mesmo tempo em que os sistemas possam se tornar cada vez mais interativos e inteligentes.

Entre as melhorias relacionadas à interface, para tornar o sistema mais conveniente, sugere-se a implementação de um acesso remoto, que permita controlar o sistema de qualquer lugar através de algum dispositivo de comunicação de dados (um computador, *palm* ou celular, por exemplo) conectado à Internet, ou o desenvolvimento de um painel portátil ou controle remoto, com comunicação sem fio, que permita controlar o sistema dentro da edificação instalada.

Entre as melhorias relacionadas ao acionamento, sugere-se realizar alguns ajustes no projeto e utilizar componentes mais robustos, permitindo que equipamentos mais potentes ou que uma quantidade maior de dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos possam ser acionados pelo sistema. Sugere-se também a possibilidade de realizar outras formas de acionamento, usando microcontroladores mais poderosos e com outros periféricos. E, por fim, sugere-se também a possibilidade de o sistema realizar outras formas de atuação sobre os aparelhos eletro-eletrônicos que, além do controle da energia de alimentação, possa também configurar o funcionamento dos dispositivos ou aparelhos, através de uma comunicação direta entre o sistema e esses aparelhos.

Entre as melhorias relacionadas à alimentação, sugere-se o desenvolvimento de uma fonte chaveada, em substituição à fonte linear desenvolvida para esse projeto, por se tratar de uma fonte que possui uma melhor estabilidade de tensão, além de outras vantagens como leveza, menor dissipação de calor e tamanho reduzido.

Entre as melhorias relacionadas aos sensores e atuadores, sugere-se o desenvolvimento de

pequenos módulos portáteis, que possam ser instalados em diferentes lugares da edificação em que o sistema estiver instalado, comunicando-se com o módulo principal do sistema através de comunicação sem fio. Dessa forma, é possível coletar dados para o sistema e realizar os acionamentos dos dispositivos e aparelhos eletro-eletrônicos sem a necessidade de modificar as instalações elétricas do local.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de baixo custo, para ser aplicado em domótica (ou automação residencial), capaz de realizar o controle de dispositivos ou aparelhos eletro-eletrônicos, permitindo realizar o acionamento automático em circunstâncias desejadas de hora e data, temperatura ou luminosidade. Desta forma, é possível programar as condições de funcionamento de cada aparelho conectado ao módulo, realizando, assim, uma utilização mais eficiente e obtendo uma economia maior de energia elétrica.

O sistema apresentou pleno funcionamento; o *firmware* desenvolvido é capaz de reconhecer todas as configurações possíveis programadas pelo usuário, a interface de menu é simples, porém clara e objetiva, permitindo, assim, uma comunicação amigável e tranquila entre o usuário e o sistema. O *hardware* desenvolvido garante o funcionamento do sistema, integrando todos seus componentes, periféricos e permitindo o acionamento dos dispositivos e aparelhos eletro-eletrônicos dentro das condições estabelecidas.

Diversas dificuldades foram encontradas ao longo do projeto, seja em relação ao funcionamento dos componentes eletrônicos, seja ao desenvolvimento do *firmware* e do *hardware*, mas felizmente todas elas foram superadas com o estudo das referências bibliográficas, realização de testes práticos e simulações e a orientação adequada recebida pelo professor-orientador do projeto.

Para que esse sistema possa se tornar um produto comercialmente interessante, existem algumas melhorias que devem ser realizadas, principalmente nos quesitos de possibilitar o acesso remoto ao sistema e permitir a configuração dos equipamentos controlados. Espera-se que ao implementar as melhorias citadas anteriormente, esse sistema seja capaz de atender da melhor maneira possível, às necessidades de comunicação, conforto e segurança dos habitantes de uma edificação, buscando manter o menor custo possível para a sua produção.

O mercado de automação residencial encontra-se em franca expansão e a tendência é de que, nos próximos anos, sistemas desse tipo estejam cada vez mais presentes na vida das pessoas.

REFERÊNCIAS

ATMEL. ***ATmega168 8-bit Microcontroller with 16 KB In-System Programmable Flash***. 2009. Disponível em: <www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2010.

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria dos circuitos**. 8ªed., Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 2005.

CABRAL, Michel. **Sistema de automação residencial de baixo custo: uma realidade possível**. 2008. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/173/160>. Acesso em: 20 abr. 2010.

FAIRCHILD. ***KA78XX/KA78XXA 3-Terminal 1 A Positive Voltage Regulator***. 2001. Disponível em: <www.datasheetcatalog.org/datasheet/fairchild/KA7805.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2010.

LEUZENSKI, Glisson. ***Automação residencial: uma proposta alternativa***. 2007. Disponível em: <http://www.aeapg.org.br/3eetcg/Anais/ARTIGOS/PDFS/Engenharia%20de%20Computa%C3%A7%C3%A3o%20e%20Inform%C3%A1tica%20-%2012.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2010.

MAXIM. ***DS1307 64x8, Serial, I²C Real-Time Clock***. 2008. Disponível em: <datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS1307.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2010.

NATIONAL. ***LM35 Precision Centigrade Temperatura Sensors***. 2000. Disponível em: <www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>. Acesso em: 24 abr. 2010.

REZENDE, Sergio. **Materiais e dispositivos eletrônicos**. 2ªed., São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004.

ROQUE, Antonio. **Sobre Domótica**. 2008. Sócio-Gerente A Casa Inteligente Lda.. Disponível em: <http://www.revolucione.com/domotica/sobre-domotica/>. Acesso em: 22 abr. 2010.

SUNHOLD. **RAS-1210**. Disponível em: <http://www.sunhold.com/ras.html>. Acesso em: 27 abr. 2010.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA DE FLORIANÓPOLIS

Renan Luís S. de Souza[1], Filipe Rogério C. da Silva[2], Nicksonei Fabra da Silva[3]

Resumo: As fontes renováveis de energia vêm se tornando cada vez mais interessantes do ponto de vista ambiental e econômico. Dentre as energias renováveis atuais, a energia solar fotovoltaica serviu para a elaboração de um estudo a respeito da viabilidade econômica da instalação de placas solares nos postes atuais de iluminação pública. A idéia foi pesquisar o valor da montagem de um sistema que consista em um módulo fotovoltaico, uma bateria, um controlador de carga e um inversor de tensão de forma que a energia gerada pela placa durante o dia fique acumulada na bateria para, durante a noite, ser utilizada para acender as lâmpadas. Para isto foram pesquisados os valores dos diversos equipamentos necessários para instalação do sistema em pelo menos duas empresas que trabalham com este tipo de tecnologia. Com os valores em mão, fez-se um cálculo para avaliar o quanto um poste convencional custa durante vinte anos e o quanto o sistema fotovoltaico custaria neste mesmo período de tempo. De acordo com os resultados obtidos, observou-se que o sistema é inviável do ponto de vista econômico e ambiental.

Palavras-chave: Energia solar fotovoltaica. Iluminação pública. Viabilidade econômica.

***Abstract**: Renewable sources of energy are becoming increasingly interesting from the standpoint of environmental and economic. Among renewable energy today, we elaborated a study about the solar photovoltaic energy in order to assess the economic feasibility of installing solar panels on poles current lighting. The idea is to find the value of building a system consisting of a photovoltaic module, a battery, a charge controller and one voltage inverter so that the energy generated by the plate during the day would be accumulated in the battery and during the night be used to light the lamps. For this we examined the values of the various equipment needed to install the system in at least two companies that work with this type of technology. With the values at hand became a calculation to assess how much a post conventional costs for twenty years and how the photovoltaic system would cost in the same period of time. According to the results obtained showed that the system is unfeasible economically.*

***Keywords**: Photovoltaic solar. Lighting public. Economic viability.*

[1] Acadêmico do CSTSEN do DAELT e do Curso Técnico Subsequente de Eletrônica da DAELN do IF-SC <renan_lss@hotmail.com>.
[2] Acadêmico do CSTSEN do DAELT do IF-SC e do Curso de Bacharelado em Física do CFM da UFSC <positivapatia@hotmail.com>.
[3] Acadêmico do CSTSEN do DAELT do IF-SC <nick_floripasouth@hotmail.com>.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa elaborada teve o intuito de avaliar se um poste solar fotovoltaico de iluminação seria um sistema economicamente viável. A idéia foi pegar um poste convencional já instalado e colocar nele uma série de equipamentos de forma que funcionasse com energia solar.

Um dos principais motivos que alicerçaram este estudo foi a possibilidade de diminuir a incidência de apagões na rede elétrica tendo em vista que os postes de iluminação pública, na maior parte das vezes, acendem suas lâmpadas em um horário muito próximo ao início do pico de consumo, momento em que mais se utiliza energia elétrica na maioria das cidades. Para muitas concessionárias de energia elétrica, é complicado abastecer as residências durante este período, ainda mais suprir o consumo das lâmpadas de iluminação pública. Com um sistema de placas fotovoltaicas, os postes não consumiriam energia elétrica da rede, pelo menos neste momento (pico do consumo), de forma que poderiam se evitar apagões.

Outra vantagem do sistema é que, caso uma região que tenha os postes solares sofra um apagão, as ruas não ficariam as escuras, pois estes, enquanto a bateria suportar a carga da lâmpada, funcionariam independentes da energia elétrica fornecida pelas distribuidoras.

As vantagens ambientais oferecidas por este sistema também podem ser levadas em conta tendo em vista que o impacto ambiental causado pela montagem de placas fotovoltaicas tende a ser menor do que o causado pela utilização de combustíveis fósseis ou pela construção de uma grande barragem para uma usina hidrelétrica.

O fato que vem impedindo a produção de placas fotovoltaicas em larga escala é o alto valor de aquisição destas pela energia que produzem.

1.1. Objetivos

O principal objetivo da pesquisa foi avaliar qual seria a viabilidade econômica da montagem do sistema de um poste fotovoltaico a partir de um poste já existente, aferindo-se, diante dos dados obtidos, o lucro ou prejuízo que ocorreria em vinte anos sob a ação desta troca.

2. SISTEMA FOTOVOLTAICO

O sistema fotovoltaico a ser estudado trabalha, basicamente, com quatro equipamentos: placa fotovoltaica, bateria, controlador de carga e inversor de tensão.

2.1. Placa fotovoltaica

Placa fotovoltaica, ou módulo fotovoltaico, é o nome dado a um sistema formado por células fotovoltaicas, que geram energia elétrica, e de diversos materiais que servirão, principalmente, para proteção, de forma que a placa tenha uma durabilidade elevada.

As células funcionam com base em um fenômeno chamado de efeito fotoelétrico, que ocorre, de forma significativa, em materiais condutores de corrente elétrica. Ele acontece quando a se deixa uma luz visível, de frequência razoavelmente grande (como azul, anil ou violeta), incidir sobre um metal condutor. Sob a radiação da luz, o metal começa a liberar os elétrons de sua camada de valência. As células mais conhecidas do mercado atual são feitas de uma combinação de dois materiais semicondutores de forma que, de acordo com uma propriedade deste tipo de material, eles consigam utilizar estes elétrons para gerar uma corrente elétrica. Com uma corrente elétrica, é possível ‘capturar’ energia elétrica.

Atualmente, existem diversas tecnologias de placas fotovoltaicas, sendo que as três mais disponíveis no mercado são as de silício monocristalino, silício policristalino e silício amorfo.

2.1.1. Silício monocristalino

O silício, sob condições normais, pode fazer quatro ligações eletrônicas, de acordo com a quantidade de elétrons em sua camada de valência. O modo como são feitas estas ligações formarão diversos tipos de silício. No caso do silício monocristalino, a ligação é aquela que aparenta maior ordenação dos átomos (Figura 1). Placas com esse tipo de silício têm rendimentos superiores a 12%, sendo que o rendimento define a quantidade de energia gerada por energia incidida sobre o painel (no caso do silício monocristalino, para cada 100 J de energia luminosa sobre a placa, mais de 12 J são convertidos em energia elétrica). Nota-se, neste silício, os átomos altamente ordenados.

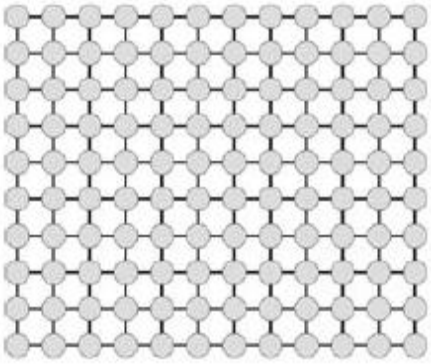


FIGURA 1 – Silício monocristalino.

Fonte: PEREIRA, 2008.

2.1.2. Silício policristalino

O silício policristalino é aquele em que as ligações não são nem tão ordenadas quanto as do monocristalino, e nem tão desordenadas quanto as do silício amorfo, conforme demonstrado na Figura 2. Um aspecto vantajoso deste tipo de silício é que a sua fabricação é mais simples do que a do monocristalino, porém seu rendimento é levemente inferior ao daquele.

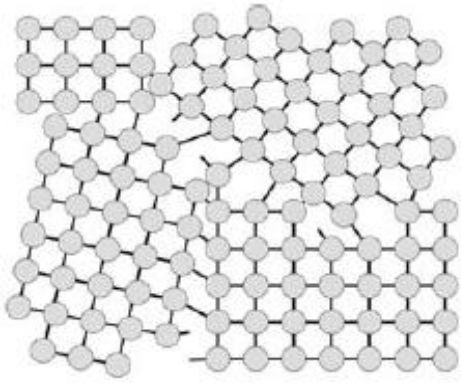


FIGURA 2 – Silício policristalino.

Fonte: PEREIRA, 2008.

Neste tipo de silício ainda existe uma ordenação, porém não é tão grande quanto à do silício monocristalino.

2.1.3. Silício amorfo

O silício amorfo, também chamado de filmes finos, é o silício que aparenta maior desordem (Figura 3) dentre os três tipos. Dentre eles, é o da tecnologia que, atualmente, menos converte a incidência da luz do sol em energia (rendimento de 7%), porém tem a vantagem de ser a que menos utiliza silício (a espessura de uma placa destas pode ser de aproximadamente 1 μm) e de ser bastante flexível.

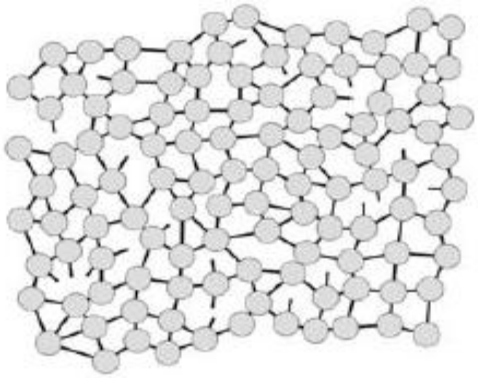


FIGURA 3 – Silício amorfo.

Fonte: PEREIRA, 2008.

Note-se que a ordenação do silício amorfo tende a ser menor do que a do silício mono e policristalino.

Uma boa parte das placas formadas com base em silício tem uma vida útil próxima de vinte anos, sendo que nesta pesquisa, a placa analisada foi uma que funciona com base na tecnologia de silício monocristalino. Na Figura 4, é apresentada uma célula deste tipo de silício.

FIGURA 4 – Célula monocristalina.

Fonte: DIRECTINDUSTRY, s.d.

Este tipo de célula normalmente é bastante escura e unicolor já que é formada praticamente por um só cristal de silício (monocristalino – um único cristal).

2.2. Bateria

A bateria é um componente eletrônico que consegue, através de um conjunto de reações, transformar energia química em elétrica e vice-versa. Uma bateria convencional pode facilmente ser descarregada ou carregada diante de um conjunto de fios.

No sistema fotovoltaico, a bateria transforma a energia elétrica gerada durante o dia pela placa fotovoltaica em energia química. Então, à noite, a energia química é convertida em energia elétrica para ser cedida à lâmpada do poste.

Uma bateria possui durabilidade próxima de quatro anos (SOLARTERRA, s.d).

2.3. Controlador de carga

Quando um equipamento é ligado à bateria, a quantidade de energia elétrica armazenada nela vai diminuindo à medida que o tempo passa. Para evitar que a bateria se descarregue por completo nos períodos longos sem insolação e de grande consumo, ou seja, tenha uma descarga profunda, é conveniente instalar um controlador de carga. Este acessório monitora a carga da bateria e impede que a mesma se descarregue completamente, e, desta forma, aumentando a sua vida útil.

2.4. Inversor de tensão

O inversor de tensão é um aparelho eletrônico que serve para alterar a tensão e a frequência de uma determinada corrente.

No sistema fotovoltaico, o intuito do inversor é transformar a energia, gerada através das placas e armazenadas nas baterias, de Corrente Contínua (CC) 12 V em Corrente Alternada (CA) 220 V, utilizada para alimentar a lâmpada do poste. A corrente CA é a encontrada nas tomadas das residências da grande maioria das cidades do Brasil; ao passo que a corrente CC é a que alimenta computadores (após sua fonte interna), carros, equipamentos portáteis, entre outros.

3. METODOLOGIA E ANÁLISE DOS DADOS

A pesquisa foi dividida, basicamente, em três etapas.

Na primeira procurou-se avaliar quais equipamentos seriam necessários para a reformulação de um poste convencional de forma que se tornasse um solar. Observou-se que sistemas fotovoltaicos convencionais utilizam, basicamente, uma placa fotovoltaica, um controlador de carga, uma bateria e um inversor. Uma vez que foi sobre

estes itens que a pesquisa foi realizada, fez-se um breve estudo a respeito de cada um deles.

Na segunda etapa, fez-se a coleta de preços dos equipamentos. Ela foi realizada no dia 2 de junho de 2009 e envolveu as empresas "UNITRON", "Comercial Rendimax" e "Solarterra".

A partir desses preços, realizou-se uma seleção dos mais baratos: a placa fotovoltaica da Solarterra, no valor de R$ 2.000,00; o controlador de carga da Unitron, por R$ 109,00; a bateria, por R$5 20,00, e o inversor de tensão, por R$ 181,00, da empresa Comercial Rendimax.

Na terceira etapa fizeram-se os cálculos para se avaliar a viabilidade econômica da implantação. Abaixo seguem os cálculos realizados durante a pesquisa.

3.1. Cálculos realizados

Os cálculos foram feitos considerando-se um período de vinte anos (tempo de vida útil de uma placa de silício monocristalino) de utilização do sistema, ou seja, analisou-se a economia ou o prejuízo que se teria durante vinte anos de placas instaladas. O cálculo final a ser realizado está apresentado na Equação 1.

$$D = C_L - C_P \qquad [1]$$

Onde:

"D" é a economia ou prejuízo, medido em reais, que a instalação do sistema traria durante um período de vinte anos. Se "D" for um valor positivo, o sistema é economicamente viável, se for negativo, do ponto de vista monetário, é inviável;

"C_L" é o custo que se tem, em reais, com o sistema atual de lâmpadas durante vinte anos;

"C_P" é o custo que se teria, em reais, com o sistema de placas fotovoltaicas durante um período de vinte anos.

Os cálculos que contém os valores de C_L e C_P serão definidos na sequência.

3.2. Custo do sistema atual de lâmpadas (C_L)

Para realizar o cálculo, considerou-se que as lâmpadas seriam incandescentes e teriam uma potência de 100 W, ou seja, 100 J/s. Os preços da energia da Celesc (Centrais Elétricas de Santa Catarina) são variáveis de acordo com o consumo de energia (existem dois preços diferentes). Para se realizar este cálculo, considerou-se que a Celesc cobra 0,326 por kWh, ou seja, a menor das duas diferentes tarifas (SANTOS, URBANETZ JUNIOR e RUTHER, 2008). Destaca-se que para este cálculo também não se utilizou o valor do serviço de manutenção do poste.

O cálculo realizado para avaliar o custo das lâmpadas (C_L) durante vinte anos foi o seguinte:

$$C_L = P_R \cdot E \cdot k \qquad [2]$$

Onde:

"P_R" é o preço da energia, em reais por kWh, fornecida pela Celesc.

"E" é a quantidade de energia, em Joules, consumida por uma lâmpada de 100 W, acesa somente a noite, durante vinte anos.

"k" é uma constante utilizada para converter J em kWh. Já que E será calculada em joules e P_R em reais por kWh, utilizou-se uma constante para converter joules em kWh, tal que:

$$k = \frac{1}{3.600.000}$$

O valor C_L serviu para avaliar o quanto se gasta com energia elétrica com a lâmpada atual durante vinte anos. Neste cálculo, também não foram inseridos o valor da lâmpada e seu custo durante este período de tempo, pois se imaginou que sua durabilidade seria a mesma que a no sistema de placas fotovoltaicas.

Considerando que a lâmpada funciona, durante um ano, em média 12 horas por dia, tem-se que o valor de E, em 20 anos, é o seguinte:

$$E = P_T \cdot 60 \cdot 60 \cdot 12 \cdot 365 \cdot 20$$

Onde:

"P_T" é a potência da lâmpada, em J/s.

Os outros valores serviram para avaliar o tempo de funcionamento da lâmpada até que se chega à unidade de energia do SI, o joule.

Portanto:

$$E = 100 \cdot 60 \cdot 60 \cdot 12 \cdot 365 \cdot 20$$

$$E = 31.536.000.000$$

Logo:

$$C_L = \frac{0{,}326 \cdot 31.536.000.000}{3600000}$$

$$C_L = 2855{,}76 \qquad [3]$$

Segundo o cálculo indicado acima, o custo total da lâmpada em um período de vinte anos é de dois mil oitocentos e cinquenta e cinco reais e setenta e seis centavos.

3.3. Custo do das placas fotovoltaicas (C_P)

Para se avaliar o custo das placas fotovoltaicas, desconsideraram-se os valores do serviço de sua manutenção e instalação. Foram desconsiderados também valores de fios de ligação.

O cálculo realizado para se avaliar o custo do sistema de placas fotovoltaicas (C_P) durante vinte anos foi o seguinte:

$$C_P = 20 \cdot \left(\frac{P_M}{d_M} + \frac{P_C}{d_C} + \frac{P_B}{d_B} + \frac{P_I}{d_I} \right) \qquad [4]$$

Onde:

"P_M" é o preço, em reais, do módulo fotovoltaico estudado;

"P_C" é o preço, em reais, do controlador de carga estudado;

"P_B" é o preço, em reais, da bateria estudada;

"P_I" é o preço, em reais, do inversor.

"d_M", "d_C", "d_B" e "d_I" são a durabilidade em anos, respectivamente, do módulo fotovoltaico (20 anos), do controlador de carga, da bateria (4 anos) e do inversor.

Não se obtiveram precisamente dados sobre a durabilidade de um controlador de carga, porém as fornecedoras "Solarterra" e "Comercial Rendimax" dão dois anos de garantia para este equipamento; então, considerou-se este valor.

Também não foram obtidos dados acerca da durabilidade de um inversor de frequência, porém o "Comercial Rendimax" cede um ano de garantia para este equipamento, então se considerou este valor.

Logo:

$$C_P = 20 \cdot \left(\frac{2.000}{20} + \frac{109}{2} + \frac{520}{4} + \frac{181}{1} \right)$$

$$C_P = 2.000 + 1.090 + 2.600 + 3.260$$

$$C_P = 9.310$$

Portanto, conforme o cálculo acima, o custo do sistema de placas fotovoltaicas é de nove mil, trezentos e dez reais.

3.4. Cálculo final

Então, com os valores de C_L e C_P, é possível calcular o lucro ou prejuízo econômico D, gerado em vinte anos de o uso do sistema de placas fotovoltaicas na iluminação pública:

$$D = C_L - C_P$$

$$D = 2.855,76 - 9.310,00$$

$$D = -6.454,24$$

Logo, caso fossem implantadas as placas de acordo com as especificações colocadas nesta pesquisa, obter-se-ia um prejuízo econômico de seis mil quatrocentos e cinquenta e quatro reais e vinte e quatro centavos.

É interessante ressaltar que os dados avaliados foram de empresas que normalmente revendem o produto, ou seja, no caso de haver uma grande compra deste sistema, é provável que o preço fique mais acessível do que o encontrado. Outro item a ser ressaltado é que, sem a informação precisa da durabilidade dos controladores de carga e inversores, o preço do sistema também aumentou.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que a instalação de um sistema fotovoltaico em um poste convencional de energia elétrica é uma opção atualmente inviável.

Sabe-se que do ponto de vista ecológico, esta geração de energia é totalmente aceitável, pois, ao contrário das usinas termoelétricas, que emitem na atmosfera uma grande quantidade de gás carbônico (CO_2), ou das usinas hidroelétricas, cuja instalação exige um abalo abundante na fauna e na flora da região, o sistema fotovoltaico auxilia no combate ao aquecimento global. Além disso, o Sol é uma fonte de energia limpa e inesgotável.

Apesar de ter todas estas vantagens, este sistema tem o inconveniente do alto investimento financeiro, seja ele por parte do governo seja por alguma empresa privada.

Porém, esta pesquisa teve como objetivo final, após a realização dos cálculos e da descoberta da total inviabilidade do sistema, incentivar outros pesquisadores a analisar diversos sistemas que auxiliem a redução do consumo de energia no horário de ponta, evitando-se apagões sem que haja a necessidade de se diminuir o consumo da população que cresce a cada dia, lembrando-se ainda da importância de se preservar o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

DIRECTINDUSTRY. ***Monocrystalline photovoltaic solar cell***. Disponível em: <http://img.directindu stry.com/images_di/photo-g/monocrystalline-photovoltaic-solar-cell-358443.jpg>. Acesso em: 23 jun. 2009.

PEREIRA, Luís Miguel Nunes. **Produção e caracterização de silício policristalino e sua aplicação a TFTs**. 2008. 254 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova Lisboa, Lisboa, 2008. Disponível em: <http://dspace.fct.unl.pt/handle/10362/1942>. Acesso em: 08 maio 2009.

SANTOS, I. P. ; URBANETZ JUNIOR, J. ; RUTHER, R. **Energia Solar Fotovoltaica como**

Fonte Complementar de Energia Elétrica para Residências na Busca da Sustentabilidade. In: XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2008, Fortaleza. XII ENTAC 2008, 2008.

SOLARTERRA. **Energia Solar Fotovoltaica**: Guia Prático. Disponível em: <http://www.solarterra.com.br/pdf/curso-energia-solar-fotovoltaica.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2009.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

SIMULAÇÃO DE FILTRO PASSA-BAIXA DE QUINTA ORDEM COM ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Carlos Filipe Gonçalves dos Santos [1]

Resumo: A proposta deste artigo foi utilizar um *software* de simulação de circuitos para verificar o efeito da tolerância nominal de componentes sobre os valores de resposta desejados de um filtro passa-baixas de quinta ordem. Através de revisão bibliográfica, foi feito um estudo breve da teoria utilizada, bem como um projeto e posterior simulação. Foram utilizados os *softwares* Proteus 6.0, muito conhecido na área de eletrônica, e o programa SG2, um *software* desenvolvido por Calisto Schwedersky e pelo professor Sidnei Nocetti Filho, da UFSC. Foram analisadas formas de onda de entrada e saída, resposta em frequência e deslocamento de fase. O modelo de amplificador operacional utilizado no *software* Proteus foi o TL072, escolhido por seu baixo custo e ampla utilização em circuitos de áudio, como equalizadores. Na simulação, obteve-se um ganho de 2,8 e uma defasagem de aproximadamente 250º, resultado do acúmulo provenientes de todas as partes que compõe o filtro.

Palavras-chave: Simulação de circuitos. Filtros ativos. Amplificador operacional TL072.

***Abstract**: This article aims the simulation of circuit using software to verify the effect of tolerance on the nominal values of components desired response of a fifth order low-pass filter. Through literature review, a brief study of the theory was made followed by the design and simulation. The software Proteus 6.0 was used, well known in the electronics area, and the program SG2, software developed by Callisto Schwedersky and Professor Sydney Nocetti Filho, UFSC. The waveforms of input and output, frequency response and phase shift were analyzed. The standard operational amplifier used in the Proteus software was TL072, chosen due to its low cost and wide use in audio circuits, such as equalizers. During simulation, the gain of the circuit achieved 2.8 and the phase shift was approximately 250º, caused by the summing of all filtering stages.*

***Keywords**: Circuit simulation. Active filters. TL072 Operational Amplifier.*

[1] Acadêmico do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Eletrônicos do IF-SC <cafilipe@ibest.com.br>.

1. INTRODUÇÃO

A definição de filtro é um dispositivo que permite que sinais com frequências dentro de uma certa faixa passem por ele enquanto sinais de outras frequências são atenuados (SCHILICHTING, 2009). Os filtros podem-se dividir em passa-baixas (permitem a passagem de frequências desde DC até abaixo de sua frequência de corte), passa-altas (permite a passagem de frequências acima da frequência de corte), passa-faixas (permite a passsagem de todas as frequências dentro de uma certa faixa) ou rejeita-faixa (atenua ou rejeita as frequências dentro de uma certa faixa).

Os filtros são chamados de passivos quando são constituídos apenas de resistores, capacitores e indutores, e ativos quando possuem, ainda, amplificadores para isolamento de sinal e amplificação de tensão.

Outra classificação para os filtros é sua ordem, que representa o número de polos do circuito. Polos, na equação matemática chamada função de transferência do circuito, são as raízes do denominador que levam esta equação ao infinito. Geralmente, filtros de ordem mais alta são mais complexos e se aproximam mais da resposta ideal. A resposta de frequência fora da banda passante de um filtro de ordem N tem uma inclinação que é assintótica para 20.N dB/década ou 6.N dB/oitava.

Uma rede RC simples é chamada de filtro de primeira ordem e sua resposta decai a partir de 20 dB/década.

Os filtros são classificados, ainda, como pertencentes a um dos vários tipos específicos de projeto que, como no caso da ordem, afetam suas respostas características dentro e fora de suas bandas passantes. Duas das mais importantes aproximações são chamadas de Butterworth e Chebyshev.

O filtro Butterworth é chamado também de filtro nivelador máximo (ou de resposta plana máxima) porque a variação no ganho dos sinais com diferentes frequências dentro da banda passante é muito pequena. É o mais próximo da resposta de um filtro ideal dentro da banda passante. O filtro Chebyshev tem uma variação maior dentro da banda passante do que o filtro Butterworth, mas decai com taxa maior fora da banda passante. A largura de ondulação RW (*ripple width*) é a variação total no ganho dentro da banda passante, geralmente expresso em decibéis. Um filtro Chebyshev pode ser projetado para ter um valor baixo de largura de oscilação, mas terá uma menor atenuação na banda passante.

O projeto do filtro de quinta ordem será feito com a junção de um filtro de primeira ordem com dois filtros de segunda ordem, um com aproximação de Buterworth e outro com Chebyshev. Isso foi feito porque simplifica tanto o projeto quanto a implementação física. Além disso, objetivou-se simular simultaneamente as topologias Butterworth e Chebyshev.

2. PROJETO DE UM FILTRO DE 1ª ORDEM

Para o cálculo do filtro passa-baixas de 1ª ordem, cujo esquemático pode ser visto na Figura 1, deve-se calcular os valores de C_1 e R_1. A configuração é não inversora e os resistores R_2 e R_3 determinam o ganho do sinal.

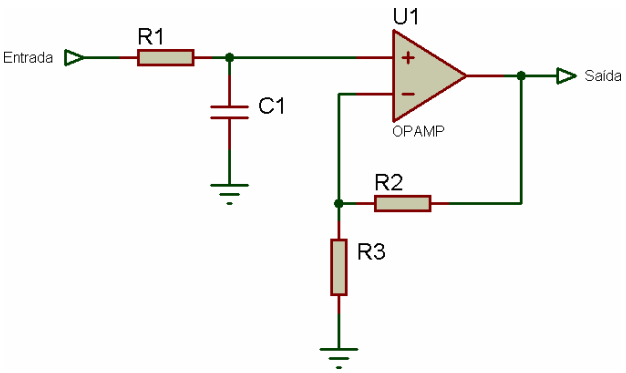


FIGURA 1 – Esquemático do filtro ativo de primeira ordem.

O capacitor poderia ser obtido arbitrariamente, mas utilizou-se uma regra prática para projetos de filtros ativos, obtida em PERTENCE JR. (2001), que é vista na Equação 1.

$$C \cong \frac{10}{f_c} \qquad [1]$$

Onde f_c é a frequência de corte desejada, em hertz, e o valor do capacitor obtido é dado em microfarads. Aplicando-se a Equação 1 para uma frequência de corte de 1 kHz, obteve-se:

$$C \cong \frac{10}{1000}$$

$$C \cong 0{,}01 \ \mu F$$

$$C \cong 10 \ nF$$

Para o cálculo de R, utilizou-se a Equação 2.

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot C} \qquad [2]$$

Aplicando-se o valor do capacitor obtido anteriormente, obteve-se o valor de R_1, arredondado para o valor comercial mais próximo.

$$R_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 10^{-9}}$$

$$R_1 = 15{,}915 \ k\Omega$$

$$R_1 \cong 15 \ k\Omega$$

O módulo da função de transferência pode ser visto na Equação 3 e sua fase na Equação 4.

$$|H(j\omega)| = \frac{A_V}{\sqrt{1 + (\omega \cdot R_1 \cdot C)^2}} \qquad [3]$$

$$\angle H(j\omega) = -\arctan(\omega \cdot R_1 \cdot C) \qquad [4]$$

Foi definido, para este projeto, obter ganho de sinal igual a 2. Para isso, os resistores R_2 e R_3 devem ser iguais. Observaram-se, também, os valores para ajustar o *offset* de corrente nas entradas do AmpOp, ou seja, o valor de R_1 deve ser o mais próximo possível do paralelo entre R_2 e R_3. Para isso, aplicaram-se as relações a seguir.

$$R_2 = R_3$$

$$R_2 = 2 \cdot R_1$$

$$R_2 = 31{,}83 \, k\Omega$$

$$R_2 \cong 33 \, k\Omega$$

Os resultados dos valores dos resistores foram alterados para os valores comerciais mais próximos, ou seja, R_1, R_2 e R_3 iguais a 15 kΩ, 33 kΩ e 33 kΩ, respectivamente.

3. PROJETO DE UM FILTRO DE 2ª ORDEM

A análise de filtros ativos exige técnicas matemáticas complexas que não serão vistas neste trabalho. Serão vistos, entretanto, métodos práticos para a construção de filtros Butterworth e Chebyshev de diversas ordens. Esses métodos se baseiam em algumas tabelas que podem ser encontradas no livro *Rapid Pratical Design of Active Filters*, de autoria de Johnson e Hilburn (Wiley, 1975). As tabelas foram obtidas do livro *Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*, Volume II, de Bogart (2001).

A Figura 2 mostra a configuração utilizada para construir filtros passa-baixas de segunda ordem, tanto para o projeto de Butterworth quanto para o de Chebyshev. O amplificador opera basicamente como uma fonte de tensão controlada por tensão não-inversora, e a configuração é conhecida como VCVS. Segundo Bogart (2001), ele é também chamado de circuito de Sallen-Key (R.P. Sallen e F.L. Key foram dois estudiosos de filtros ativos que publicaram em 1955 um excelente artigo sobre o assunto).

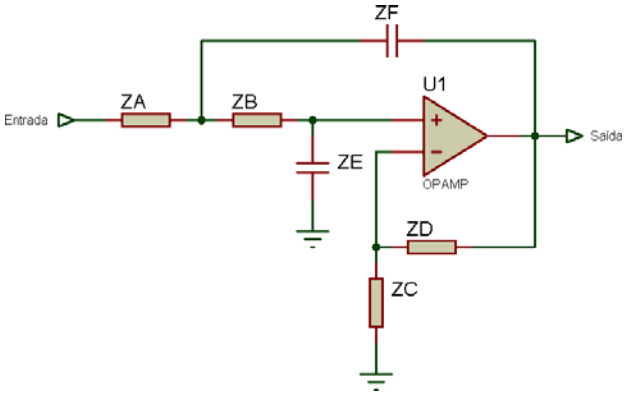


FIGURA 2 – Esquemático filtro passa-baixas de segunda ordem, configuração VCVS.

Os valores dos componentes no projeto VCVS dependem da resposta exigida (Butterworth ou Chebyshev), do ganho necessário no passa-faixa e, no caso do filtro de Chebyshev, da tolerância da largura de oscilação na banda passante. São utilizadas diferentes buscas nas tabelas para determinar os valores dos componentes correspondentes a essas várias opções.

O procedimento de projeto começa com a escolha de um valor para a capacitância C. Depois, uma constante designada por K é calculada como mostra a Equação 5.

$$K \cong \frac{10^{-4}}{f_c \cdot C} \qquad [5]$$

Onde f_c é a frequência de corte desejada, em hertz, e C é valor da capacitância escolhida, em farads. Uma tabela apropriada é usada para obter os valores pelos quais K é multiplicado para que sejam obtidos os valores de cada componente. A Tabela 1 pode ser usada para o projeto de um filtro passa-baixas com aproximação Butterworth.

TABELA 1 – Projeto de filtros VCVS passa-baixas Butterworth de segunda ordem.

	Valores dos elementos			
Ganho	1	2	4	6
R_1	1,422	1,126	0,824	0,617
R_2	5,399	2,250	1,537	2,051
R_3	aberto	6,752	3,148	3,203
R_4	curto	6,752	9,444	16,012
C_1	0,33C	C	2C	2C

A Tabela 2 pode ser usada para o projeto de um filtro passa-baixas com aproximação Chebyshev com largura de ondulação de 2 dB.

TABELA 2 – Projeto de filtros VCVS passa-baixas Chebyshev de segunda ordem com largura de ondulação de 2 dB.

	Valores dos elementos			
Ganho	1	2	4	6
R_1	2,328	1,980	1,141	0,786
R_2	13,220	1,555	1,348	1,957
R_3	aberto	7,069	3,320	3,292
R_4	curto	7,069	9,959	16,46
C_1	0,1C	C	2C	2C

É importante lembrar que, nas tabelas, as resistências estão em quilohms.

Para o projeto do filtro passa-baixas Butterworth de 2ª ordem, determinou-se frequência de corte de 1 kHz e ganho 2 na banda passante. De acordo com os procedimentos vistos anteriormente, arbitrou-se um capacitor de 47 nF. Depois, determinou-se a constante K, com a Equação 5.

$$K \cong \frac{10^{-4}}{f_c \cdot C}$$

$$K \cong \frac{10^{-4}}{1000 \cdot 47 \cdot 10^{-9}}$$

$$K \cong 2{,}128$$

Após isso, multiplicou-se o valor da constante K pelos fatores encontrados nas tabelas correspondentes para obter os valores dos componentes. No caso desse filtro:

$$R_1 = 1{,}126 \cdot 2{,}127$$

$$R_1 = 2{,}395\,k\Omega$$

$$R_2 = 2{,}250 \cdot 2{,}127$$

$$R_2 = 4{,}785\,k\Omega$$

$$R_3 = 6{,}752 \cdot 2{,}127$$

$$R_3 = 14{,}361\,k\Omega$$

$$R_4 = 6{,}752 \cdot 2{,}127$$

$$R_4 = 14{,}361\,k\Omega$$

$$C_1 = C = 47\,nF$$

Para o projeto do filtro de 2ª ordem Chebyshev, arbitrou-se a mesma frequência de corte, valor para o capacitor C, ganho na banda passante e, portanto, a mesma constante K. Consultando-se a Tabela 2, obteve-se:

$$R_1 = 1{,}980 \cdot 2{,}127$$

$$R_1 = 4{,}211\,k\Omega$$

$$R_2 = 1{,}555 \cdot 2{,}127$$

$$R_2 = 4{,}524\,k\Omega$$

$$R_3 = 7{,}069 \cdot 2{,}127$$

$$R_3 = 15{,}053\,k\Omega$$

$$R_4 = 7{,}069 \cdot 2{,}127$$

$$R_4 = 15{,}053\,k\Omega$$

$$C_1 = C = 47\,nF$$

4. SIMULAÇÃO

O filtro passa-baixas de primeira ordem calculado na seção 2 foi simulado no *software* Proteus. A Figura 3 mostra a forma de onda na saída, para entrada senoidal de 1 volt de pico e frequência de 1 kHz, projetada como frequência de corte.

A Figura 4 mostra a resposta em frequência simulada. Os resultados ficaram muito próximos do que foi calculado. A saída ficou em 1,4 V, no corte, a e resposta em frequência demonstrou atenuação de 20 dB/década.

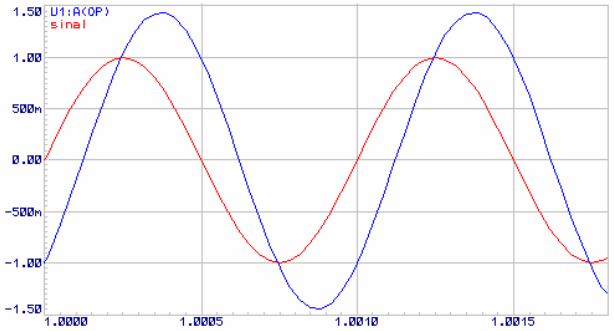


FIGURA 3 – Forma de onda de entrada (azul) e de saída (vermelho).

Os valores anteriormente calculados para o filtro Butterworth foram adaptados ligeiramente, para que pudessem ser simulados com valores comerciais.

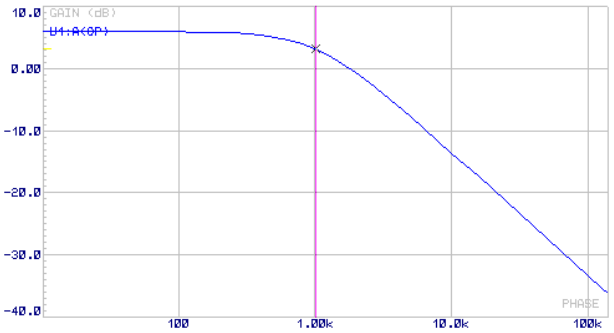


FIGURA 4 – Resposta em frequência do filtro de primeira ordem.

A Figura 5 mostra a resposta em frequência, com escala de ganho linear. A resposta está levemente diferente da calculada, em função da utilização dos valores comerciais dos componentes. É visível a resposta plana nas frequências em banda passante, como visto na análise teórica, e fora dela a queda no ganho foi muito próxima do esperado.

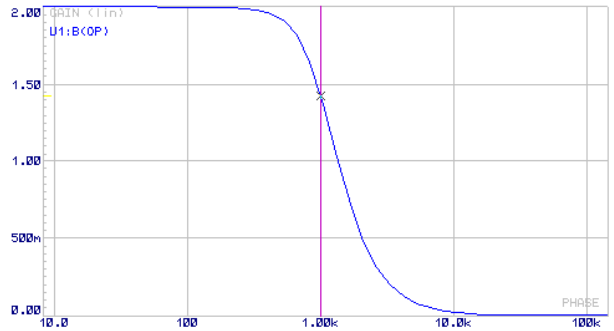


FIGURA 5 – Resposta em frequência do filtro Butterworth de segunda ordem.

Da mesma forma que o Butterworth, os valores dos componentes foram um pouco modificados para se ajustarem aos valores comerciais. A Figura 6 mostra a resposta em frequência do filtro, em escala linear para o ganho, no qual se pode ver a oscilação

dentro da banda passante, mas uma queda mais acentuada que o filtro Butterworth fora dela. A resposta ficou muito próxima da calculada.

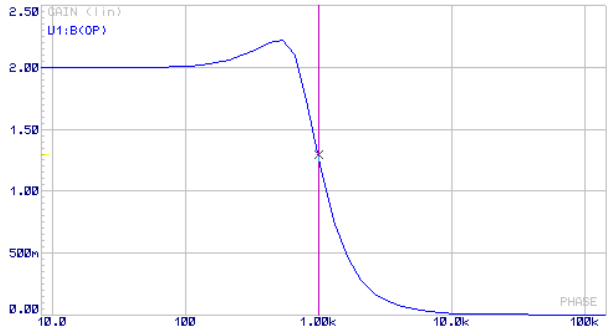


FIGURA 6 – Resposta em frequência do filtro Chebshev de segunda ordem.

A simulação do filtro passa-baixas de quinta ordem pode ser vista na Figura 7, no domínio do tempo, com as formas de onda de entrada e saída do filtro em sua frequência de corte, 1 kHz. Aplicada uma onda senoidal de 1 volt de pico, obteve-se uma saída de 2,8 volts no corte, muito próxima do esperado. É possível ainda ver a defasagem do sinal de saída, em torno de 250º. Para entrada de 1 V, a saída do primeiro filtro é de 1,4 V e as saídas dos outros estágios é dada pelas Equações 7 e 8.

$$V_o = \frac{1{,}4 \cdot 2}{\sqrt{2}} \qquad [7]$$

$$V_o = 1{,}98\,V$$

$$V_o = \frac{1{,}98 \cdot 2}{\sqrt{2}} \qquad [8]$$

$$V_o = 2{,}8\,V$$

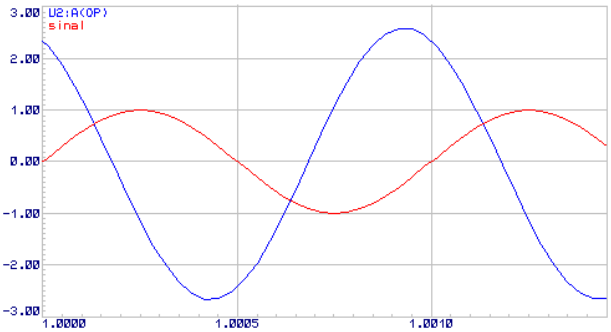


FIGURA 7 – Formas onda de entrada (azul) e saída (vermelho) do filtro de 5ª ordem.

Na Figura 8 pode ser vista a resposta em frequência do filtro, com escala de ganho em decibéis. Os resultados obtidos ficaram próximos dos ideais, com uma leve diferença por conta da alteração dos componentes para valores comerciais.

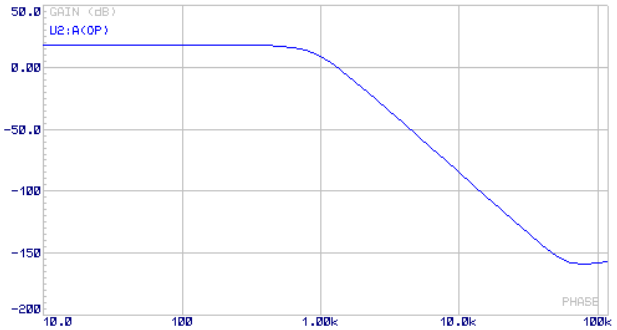


FIGURA 8 – Resposta em frequência do filtro de 5ª ordem, com queda de 90 dB/década.

Na Figura 9 foi plotada a resposta em frequência obtida pelo *software* SG2. Foi adicionada tolerância de 5% para resistores e 10% para capacitores, valores mais comuns no mercado para esses componentes. As linhas indicam a resposta ideal (preto), e as repostas com tolerância abaixo e acima do valor nominal (vermelho e verde, respectivamente). Notou-se que o Proteus utiliza uma modelagem mais realista da resposta em frequência do ampop, enquanto que o modelo do *software* SG2 utilizou-se uma versão próxima do comportamento ideal. Essas diferenças se tornaram evidentes em altas freqüências.

Para o projetista ou pesquisador, essas diferenças podem ser importantes, já que, em muitas vezes, pode haver a necessidade de se utilizar no projeto componentes de menor custo, mas que possam mesmo assim, apresentar resultados aceitáveis. Uma ferramenta de simulação pode ajudar neste sentido.

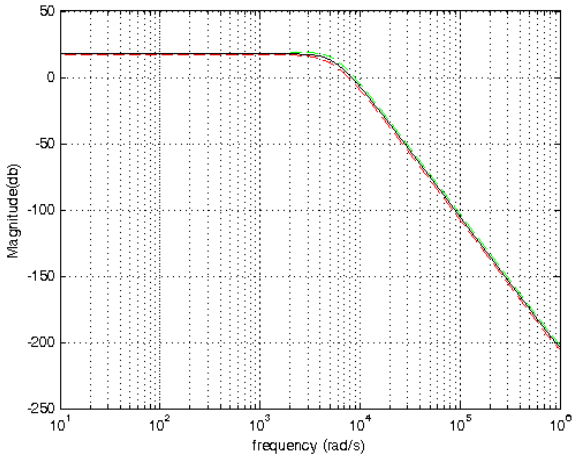


FIGURA 9 – Resposta em frequência com tolerância de componentes.

A Figura 10 mostra um detalhe do gráfico, numa faixa de frequência de 1 krad/s até 100 krad/s. É possível ver mais claramente as diferenças da tolerância dos componentes sobre o resultado final do filtro de quinta ordem.

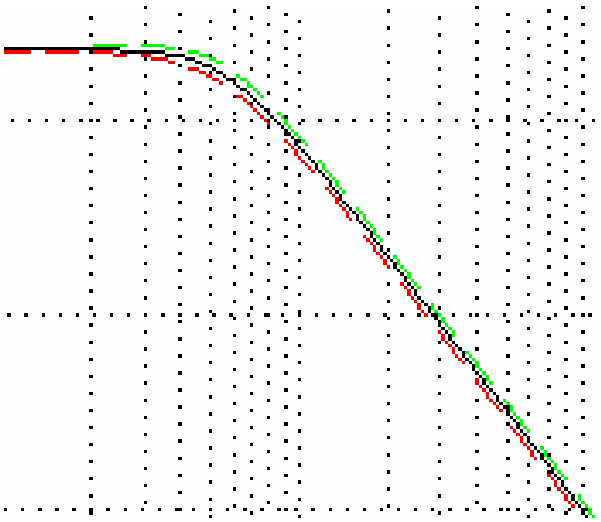


FIGURA 10 – Detalhe do gráfico da resposta em frequência com tolerância de componentes.

A Figura 11 mostra o ângulo de defasagem em relação ao aumento da frequência, levando em conta uma tolerância de 10% apenas para o capacitor.

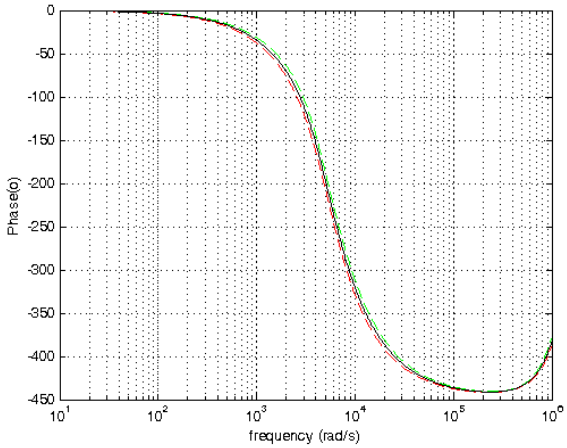


FIGURA 11 – Evolução do ângulo de defasagem com o aumento da freqüência.

A Figura 12 mostra um detalhe do gráfico da Figura 11, na faixa entre 1 krad/s até 10 krad/s.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observando-se no *software* Proteus as formas de onda de entrada e saída do filtro de 5ª ordem, percebeu-se um ganho de 2,8 e uma defasagem de aproximadamente 250º, resultado do acúmulo provenientes de todos os filtros que o compõe.

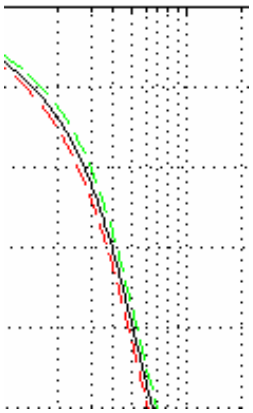


FIGURA 12 – Detalhe do gráfico da evolução do ângulo de defasagem com o aumento da frequência.

No *software* SG2, observou-se o efeito das tolerâncias nominais dos componentes, 5% para os resistores e 10% para os capacitores, que são valores comercialmente encontrados. As diferenças mais significativas foram vistas próximo a frequência de corte. Assim, se o projeto do filtro exigir exatidão nessa faixa de frequência, pode ser interessante o uso de componentes com menor tolerância, acarretando em custo geralmente mais elevado.

Ficou evidente, por esses resultados, a importância e o poder dos *softwares* de simulação para o profissional ou estudante da área de eletrônica. O uso das ferramentas computacionais está consolidado e estas deverão ser cada vez mais utilizadas. É importante observar, no entanto, que uma montagem prática desses circuitos poderia apresentar algumas diferenças, já que o *software* é incapaz de considerar todas as variáveis que podem estar presentes no mundo físico.

REFERÊNCIAS

BOGART JR., T. F. *Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*. Volume II. Makron Books Ltda, São Paulo-SP, 2001.

PERTENCE JR., A. *Eletrônica analógica*: amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório. Porto Alegre: Bookman, 2003.

SCHLICHTING, L.C.M. Notas de aula. IF-SC, Florianópolis, 2009.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

CONVOLUÇÃO DE SINAIS: DEFINIÇÃO, PROPRIEDADES E FERRAMENTAS

Miguel Antonio Sovierzoski[1]

Resumo: Este trabalho apresenta a operação de convolução para diferentes representações de sinais ou funções, bem como as suas propriedades e o relacionamento com as transformadas de Laplace, de Fourier e Z. Em cada situação abordada da operação de convolução são apresentados os sinais e o desenvolvimento detalhado da operação. Determinadas situações de sinais permitem diferentes soluções para a operação de convolução. Devido aos diferentes tipos de combinações de sinais e ferramentas matemáticas não é possível esgotar o assunto, mas foi apresentada a operação de convolução com diversos tipos de sinais e ferramentas. Através de exemplos foi demonstrado que o uso das transformadas de Laplace ou de Fourier, para sinais contínuos, ou da transformada Z, para sinais discretos, agiliza a resolução da operação de convolução.

Palavras-chave: Convolução. Convolução contínua. Convolução discreta.

Abstract: *This paper presents the operation of convolution with different representations of signals or functions and their properties and relationship with Laplace, Fourier and Z transforms. In each situation, the operation of convolution signals is presented, followed by the detailed development of the solution. In certain situations, the signals allow different solutions to the convolution operation. Due to the extent of combinations of signals and mathematical tools available, the subject cannot be exhaust, but it discussed in a vast majority of situations where the convolution operation is used. It was showed that the use of Laplace transform or Fourier transform for continuous signals or the Z transform for discrete signals, are an easy and quick method to solve the convolution.*

Keywords: *Convolution. Continuous convolution. Discrete convolution.*

[1] Professor da UTFPR <miguelaso@utfpr.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

A operação de convolução é aplicada em várias situações na matemática e na engenharia, fazendo uso de diferentes ferramentas para a sua solução.

Inicialmente é apresentada a definição da operação de convolução e em seguida são abordadas diversas situações de convolução de sinais de tempo contínuo e de tempo discreto utilizando a definição e outras abordagens. São apresentadas também as transformadas de Laplace, de Fourier e Z e o procedimento para resolver a convolução com o uso destas ferramentas.

São apresentados vários exemplos de representações de sinais ou funções: sinais em tempo contínuo, sinais em tempo discreto, sinais de duração infinita e de duração finita. Em todas as situações o objetivo é executar e analisar a operação de convolução entre os sinais. Cada situação é abordada através de um exemplo numérico para que o leitor possa acompanhar detalhadamente o desenvolvimento e refazer a solução. Um mesmo exemplo pode permitir vários procedimentos para a solução com a aplicação de diferentes ferramentas matemáticas. Não é possível abordar todas as combinações de sinais e de ferramentas para a solução da operação de convolução, mas foi apresentada e exemplificada a grande maioria das situações de sinais envolvendo a operação de convolução.

2. OPERAÇÃO DE CONVOLUÇÃO

A convolução opera com duas funções ou com dois sinais, $x(t)$ e $h(t)$, para gerar uma terceira função ou sinal como resultado da operação, $y(t)$. A interpretação para a função $h(t)$, na engenharia, é

que esta é a resposta impulsiva de um sistema linear e invariante no tempo, mas também não deixa de ser uma função matemática que descreve as características intrínsecas de um sistema. O princípio da superposição é válido em sistemas lineares. Nos sistemas invariantes no tempo, um atraso no sinal de entrada, provoca o correspondente atraso no sinal de saída. A Figura 1(a) apresenta um sistema em tempo contínuo *t*, com um sinal de entrada $x(t)$ iteragindo com a resposta impulsiva $h(t)$, e gerando o sinal de saída $y(t)$. A Figura 1(b) apresenta a mesma ideia para um sistema de tempo discreto *n*, com um sinal discreto de entrada $x[n]$ iteragindo com a resposta impulsiva $h[n]$, e gerando o sinal discreto de saída $y[n]$.

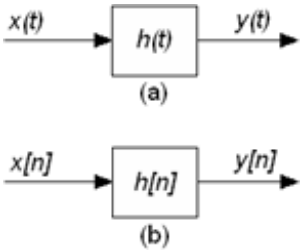


FIGURA 1 – Representação dos sinais em (a) um sistema de tempo contínuo e em (b) um sistema de tempo discreto.

2.1. Convolução de sinais de tempo contínuo

A operação de convolução para sinais de tempo contínuo é definida pela Equação 1, na qual o símbolo * (asterisco) é a representação gráfica da operação de convolução entre as funções $x(t)$ e $h(t)$, e a integral é denominada de integral da convolução. Lê-se que o sinal $y(t)$ é o sinal $x(t)$ convoluído com o sinal $h(t)$. A variável de integração é alterada para τ (letra grega – tal). Na integral de convolução, uma das funções sofre apenas a mudança de variável $x(\tau)$, enquanto a outra função sofre a mudança de variável $h(\tau)$, seguida pela operação de reflexão $h(-\tau)$, e por um deslocamento pela variável *t*, resultando em $h(t - \tau)$.

$$y(t) = x(t) * h(t)$$
$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t-\tau) \cdot d\tau \qquad [1]$$

A operação de convolução é um operador linear possuindo as propriedades matemáticas de **comutatividade**, de **distributividade** e de **associatividade**, conforme apresentam as Equações 2, 3 e 4, respectivamente. Estas propriedades não serão demonstradas, mas a prova destas e de outras propriedades são encontradas nas referências.

$$x(t) * h(t) = h(t) * x(t) \qquad [2]$$

$$x(t) * \{ y(t) + z(t) \} = x(t) * y(t) + x(t) * z(t) \qquad [3]$$

$$x(t) * \{ y(t) * z(t) \} = \{ x(t) * y(t) \} * z(t) \qquad [4]$$

A convolução de dois sinais contínuos finitos, por exemplo, $x(t)$ com duração L_x e $y(t)$ com duração L_y, resultará num sinal convoluído com duração $L_x + L_y$. Considerando o sinal $x(t)$ contido no intervalo $[I_x , F_x]$, e o sinal $y(t)$ contido no intervalo $[I_y , F_y]$, e devido às operações de reflexão e deslocamento o resultado da convolução dos sinais contínuos finitos estará contida no intervalo $[I_x + I_y , F_x + F_y]$.

2.2. Convolução de sinais de tempo discreto

A definição matemática da convolução para sinais de tempo discreto é semelhante à de sinais de tempo contínuo, sendo que as variáveis envolvidas agora são variáveis discretas, e a integral transforma-se em um somatório, conforme apresenta a Equação 5. A convolução é denominado de soma da convolução.

$$y[n] = x[n] * h[n]$$
$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[n] \cdot h[n-k] \qquad [5]$$

As propriedades matemáticas de **comutatividade**, **distributividade** e **associatividade** também se aplicam à convolução de funções discretas, conforme apresentam as Equações 6, 7 e 8.

$$x[n] * h[n] = h[n] * x[n] \qquad [6]$$

$$x[n] * \{ y[n] + z[n] \} = x[n] * y[n] + x[n] * z[n] \qquad [7]$$

$$x[n] * \{ y[n] * z[n] \} = \{ x[n] * y[n] \} * z[n] \qquad [8]$$

Para o caso da convolução de sinais discretos finitos, por exemplo, $x[n]$ com L_x amostras e $y[n]$ com L_y amostras, o sinal convoluído possuirá $L_x + L_y - 1$ amostras. Com as amostras significativas de $x[n]$ estando no intervalo $[I_x , F_x]$, e as amostras significativas de $y[n]$ estando no intervalo $[I_y , F_y]$, devido às operações de reflexão e deslocamento, o sinal convoluído estará restrito ao intervalo $[I_x + I_y , F_x + F_y]$.

3. REALIZANDO A CONVOLUÇÃO DE SINAIS DE TEMPO CONTÍNUO

Este item apresenta exemplos da operação de convolução de sinais de tempo contínuo com duração infinita e finita, utilizando a definição matemática da operação.

3.1. Convolução de sinais contínuos infinitos

Na convolução de sinais contínuos infinitos, foram utilizadas como exemplo duas funções exponenciais decrescentes: $x(t)$, apresentada na

Equação 9, e $h(t)$, apresentada na Equação 10, definidas para $t \geq 0$. As funções trabalhadas para realizar a operação, através da troca de variáveis de t para τ, da operação de reflexão e o deslocamento no sinal h são apresentadas nas Equações 11 e 12. As etapas da operação de convolução para sinais contínuos infinitos são apresentadas na Figura 2.

$$x(t) = 2 \cdot e^{-t} \cdot u(t) \quad [9]$$

$$h(t) = e^{-3 \cdot t} \cdot u(t) \quad [10]$$

$$x(\tau) = 2 \cdot e^{-\tau} \quad [11]$$

$$h(-\tau) = e^{-3 \cdot (-\tau)}$$

$$h(t-\tau) = e^{-3 \cdot (t-\tau)} \quad [12]$$

Para realizar a operação de convolução pela definição, normalmente é necessário o auxílio de gráficos apresentando a iteração dos sinais para determinar as condições de integração. Na interpretação da convolução, um sinal permanece na sua posição, no caso da Figura 2, o sinal $x(\tau)$, e o outro sinal $h(t - \tau)$ é posicionado em $t = -\infty$ sendo deslocado até $t = +\infty$ realizando a convolução.

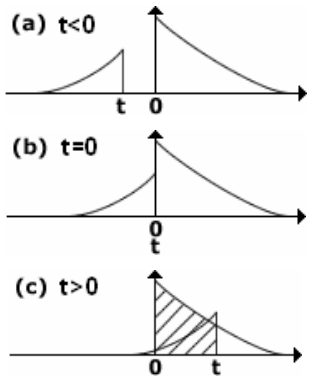


FIGURA 2 – Exemplo da operação de convolução com os sinais contínuos infinitos das Equações 9 e 10, utilizando a definição de convolução contínua.

Para as situações $t < 0$ e $t = 0$, representados pelas Figuras 2(a) e 2(b), resultam em valor *0* para a convolução, pois os sinais não possuem sobreposição.

Para a situação $t > 0$, apresentada pela Figura 2(c), os sinais são sobrepostos, sendo que a convolução dos sinais resulta em valor diferente de *0*. Observa-se, na figura, que o intervalo de integração é de *0* até *t*. A expressão matemática $y(t)$, calculada a partir da definição da convolução é apresentada pela Equação 13.

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \cdot h(t-\tau) \cdot d\tau$$

$$y(t) = \int_{0}^{t} 2 \cdot e^{-\tau} \cdot e^{-3 \cdot (t-\tau)} \cdot d\tau$$

$$y(t) = \int_{0}^{t} 2 \cdot e^{-3 \cdot t + 2 \cdot \tau} \cdot d\tau$$

$$y(t) = \int_{0}^{t} 2 \cdot e^{-3 \cdot t} \cdot e^{2 \cdot \tau} \cdot d\tau$$

$$y(t) = 2 \cdot e^{-3 \cdot t} \cdot \int_{0}^{t} e^{2 \cdot \tau} \cdot d\tau$$

$$y(t) = 2 \cdot e^{-3 \cdot t} \cdot \left. \frac{e^{2 \cdot \tau}}{2} \right|_{0}^{t}$$

$$y(t) = 2 \cdot e^{-3 \cdot t} \cdot \frac{\left(e^{2 \cdot t} - 1\right)}{2}$$

$$y(t) = e^{-3 \cdot t} \cdot e^{2 \cdot t} - e^{-3 \cdot t}$$

$$y(t) = e^{-t} - e^{-3 \cdot t}$$

$$y(t) = \left(e^{-t} - e^{-3 \cdot t}\right) \cdot u(t) \quad [13]$$

A Figura 3 apresenta o comportamento dos sinais $x(t)$ (Equação 9), $h(t)$ (Equação 10) e da convolução $y(t)$, descrita pela Equação 13.

Com esta análise observa-se que a convolução de dois sinais contínuos infinitos resultou num sinal contínuo infinito. Neste caso, é necessário o auxílio de gráficos (Figura 2), apresentando a iteração entre os sinais e determinando os limites de integração para realizar a operação de convolução.

3.2. Convolução de sinais contínuos finitos

Para apresentar a convolução de sinais contínuos finitos, foram utilizados como funções exemplo dois pulsos retangulares $x(t)$ e $h(t)$, apresentados nas Figuras 4(a) e 4(b), respectivamente. Estes sinais elementares possuem a sua definição através de sentenças matemáticas, indicadas pelas Equações 14 e 15.

$$x(t) = u(t) - u(t-2)$$

$$x(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t < 2 \\ 0 & caso\,contrário \end{cases} \quad [14]$$

$$h(t) = 2 \cdot u(t) - 2 \cdot u(t-4)$$

$$h(t) = \begin{cases} 2 & 0 \le t < 4 \\ 0 & caso\,contrário \end{cases} \qquad [15]$$

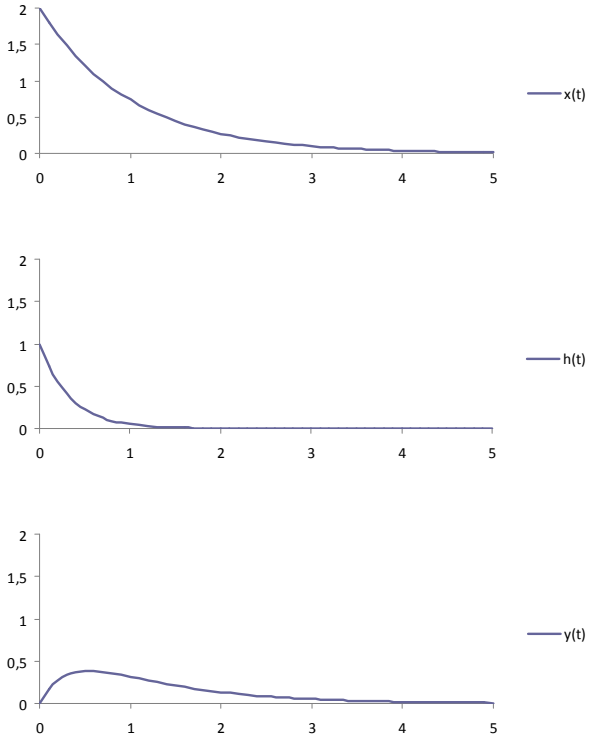


FIGURA 3 – Representação dos sinais das Equações 9 e 10 e o resultado da convolução (Equação 13).

Como regra prática para a execução da convolução, a operação é mais fácil de ser realizada se for utilizado o sinal mais simples para ser refletido e deslocado. Como a operação tem a propriedade de ser comutativa, optou-se por deslocar e refletir o sinal $x(t)$.

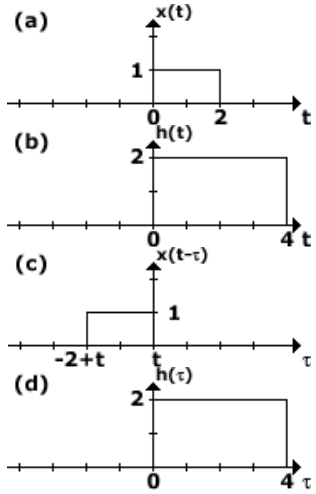


FIGURA 4 – Sinais contínuos finitos das Equações 14 e 15, e suas transformações para a operação de convolução.

As Figuras 4(c) e 4(d) apresentam os sinais preparados para realizar a operação, fazendo a troca de variáveis de t para τ, realizando a operação de reflexão e o deslocamento no sinal $x(t)$, e a troca de variável na função $h(t)$.

Para realizar a operação de convolução pela definição, normalmente é necessário o auxílio de gráficos apresentando a iteração dos sinais para determinar o intervalo de integração. Na interpretação da convolução, um sinal permanece estático na sua posição, no caso da Figura 5, o sinal $h(\tau)$. O outro sinal $x(t - \tau)$ é posicionado em $t = -\infty$ sendo deslocado até $t = +\infty$ para realizar a integral da convolução.

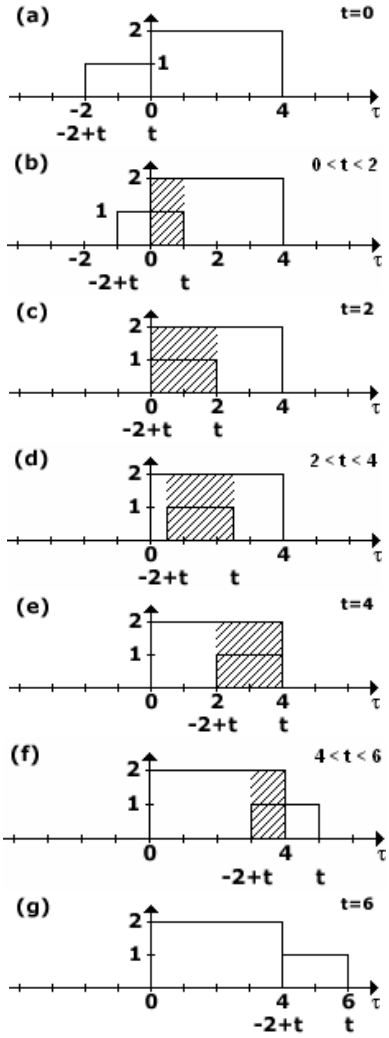


FIGURA 5 – Operação de convolução entre os sinais contínuos finitos das Equações 14 e 15.

O instante $t = 0$, apresentado pela Figura 5(a), resulta em valor *0* para a convolução, pois os sinais estão no limite para iniciar a sobreposição. Para $0 < t < 6$, os sinais são parcialmente ou completamente sobrepostos, sendo que o produto dos sinais e consequentemente a área sobre este produto resultam em valor diferente de *0*, conforme

apresentam as Figuras 5(b) à 5(f). Uma situação limite ocorre para $t = 2$, sendo que o sinal $x(t - \tau)$ está completamente sobreposto ao sinal $h(\tau)$. Desta forma executa-se a análise para o intervalo $0 \leq t < 2$. Para este intervalo, observa-se na Figura 5(b) que o produto das funções possui o intervalo de integração entre 0 e t. A convolução para o intervalo $0 \leq t < 2$ resulta na função $y(t) = 2 \cdot t$, aumentando linearmente a área determinada pelo produto das duas funções em função do tempo.

No intervalo $2 \leq t < 4$, observa-se que, nas Figuras 5(c), 5(d) e 5(e), o resultado da integral não é alterado, pois o sinal $x(t - \tau)$ encontra-se completamente sobreposto pelo sinal $h(\tau)$, sendo deslocado sob este. Observa-se que o intervalo de integração varia de $-2 + t$ até t. O desenvolvimento da integral de convolução para este intervalo resulta na Equação 16.

$$y(t) = \int_{-2+t}^{t} 2 \cdot 1 \cdot d\tau$$

$$y(t) = \int_{-2+t}^{t} 2 \cdot d\tau$$

$$y(t) = 2 \cdot \tau \Big|_{-2+t}^{t}$$

$$y(t) = 2 \cdot t - 2 \cdot (-2 + t)$$

$$y(t) = 2 \cdot t + 4 - 2 \cdot t$$

$$y(t) = 4 \qquad [16]$$

Fazendo a análise para este intervalo, a convolução resulta na função constante $y(t) = 4$, obtida do produto das duas funções multiplicado pela largura do sinal $x(t - \tau)$.

A partir do instante $t = 4$, o sinal $x(t - \tau)$ não está mais completamente sobreposto pelo sinal $h(\tau)$, sendo necessárias novas condições de análise. A Figura 5(f) apresenta esta situação, sendo que o limite ocorre para $t = 6$. Para a análise no intervalo $4 \leq t \leq 6$, o intervalo de integração varia de $-2 + t$ até 4. O desenvolvimento da integral resulta na Equação 17.

$$y(t) = \int_{-2+t}^{4} 2 \cdot 1 \cdot d\tau$$

$$y(t) = \int_{-2+t}^{4} 2 \cdot d\tau$$

$$y(t) = 2 \cdot \tau \Big|_{-2+t}^{4}$$

$$y(t) = 2 \cdot 4 - 2 \cdot (-2 + t)$$

$$y(t) = 8 + 4 - 2 \cdot t$$

$$y(t) = 12 - 2 \cdot t \qquad [17]$$

A convolução para este intervalo resulta na função $y(t) = 12 - 2 \cdot t$. Para $t \geq 6$ não há mais sobreposição dos sinais, resultando em valor 0 para a convolução, conforme apresentado na Figura 5(g).

As sentenças que descrevem o resultado da convolução $y(t)$ são apresentadas na Equação 18 e a representação gráfica da convolução é apresentada na Figura 6.

$$y(t) = \begin{cases} 2 \cdot t, & 0 \leq t < 2 \\ 4, & 2 \leq t < 4 \\ 12 - 2 \cdot t, & 4 \leq t \leq 6 \\ 0, & caso\,contrário \end{cases} \qquad [18]$$

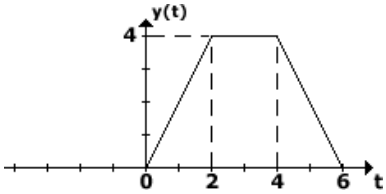


FIGURA 6 – Resultado da convolução da Figura 5, para os sinais contínuos finitos da Figura 4 (Equações 14 e 15).

Como os sinais $x(t)$ e $h(t)$ são contínuos e finitos, observa-se que $L_x = 2$ e $L_h = 4$, resultando em $L_y = 6$. Quanto aos intervalos, para o sinal $x(t)$ o intervalo é $[0\ ,\ 2]$, e para o sinal $h(t)$ o intervalo é $[0\ ,\ 4]$, resultando em $y(t)$ no intervalo $[0\ ,\ 6]$.

Observa-se nesta análise de sinais contínuos finitos que é necessária a realização da convolução por intervalos devido ao sinal possuir descontinuidades, e mudando os intervalos de integração da integral de convolução. Neste caso, é necessário o auxílio de gráficos (Figura 5), apresentando a iteração entre os sinais e determinando os intervalos de integração.

3.3. Convolução de sinal contínuo finito com sinal contínuo infinito

Para apresentar a convolução entre um sinal contínuo finito e um sinal contínuo infinito foram utilizados os sinais exemplos apresentados pelas Equações 19 e 20, cujo comportamento é apresentado pelas Figuras 7(a) e 7(b).

$$x(t) = 2 \cdot u(t) - 2 \cdot u(t - 3) \qquad [19]$$

$$h(t) = e^{-2 \cdot t} \cdot u(t) \qquad [20]$$

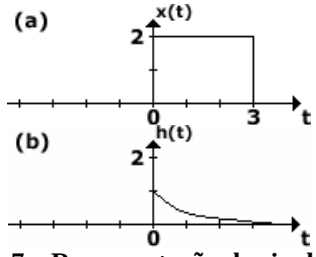


FIGURA 7 – Representação do sinal contínuo finito *x*(*t*) e infinito *h*(*t*) das Equações 19 e 20.

Aplicando-se a integral da convolução, refletindo e deslocando a função *x*(*t*), observa-se na Figura 8(a) que, para $t < 0$, não existe convolução.

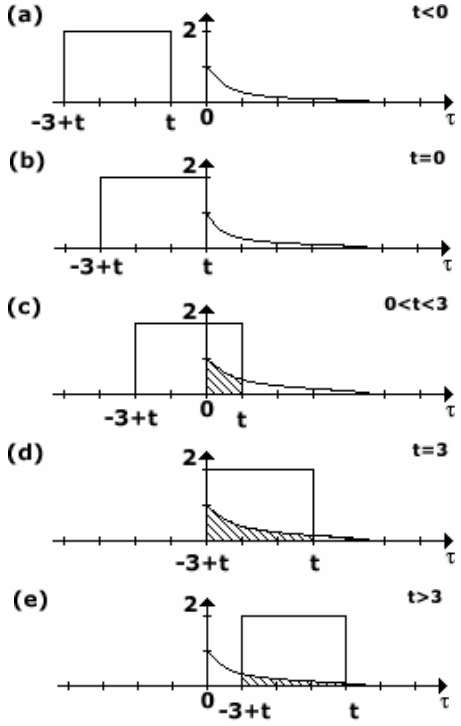


FIGURA 8 – Operação de convolução de um sinal contínuo infinito com um sinal contínuo finito, utilizando a definição de integral de convolução.

A convolução inicia para $t = 0$, como apresenta a Figura 8(b), ocorrendo uma situação limite para $t = 3$, conforme apresenta a Figura 8(d). Para o intervalo $0 \le t < 3$, observa-se o intervalo de integração de *0* até *t*, cujo desenvolvimento da integral de convolução é apresentado pela Equação 21.

$$y(t) = \int_0^t 2 \cdot e^{-2\cdot\tau} d\tau$$

$$y(t) = -e^{-2\cdot\tau}\Big|_0^t$$

$$y(t) = 1 - e^{-2\cdot t}, 0 \le t < 3 \qquad [21]$$

Para o intervalo $t \ge 3$, situação apresentada pela Figura 8(e), o sinal finito *x*(*t*) continua deslocando-se até o infinito, ocorrendo a convolução com o sinal *h*(*t*) até o infinito. Neste intervalo de análise, a integral da convolução possui o intervalo de integração de $-3 + t$ até *t*, sendo apresentada pela Equação 22.

$$y(t) = \int_{-3+t}^t 2 \cdot e^{-2\cdot\tau} d\tau$$

$$y(t) = -e^{-2\cdot\tau}\Big|_{-3+t}^t$$

$$y(t) = -\left(e^{-2\cdot t} - e^{6-2\cdot t}\right)$$

$$y(t) = -e^{-2\cdot t} + e^6 \cdot e^{-2\cdot t}$$

$$y(t) = e^{-2\cdot t} \cdot \left(e^6 - 1\right), t \ge 3 \qquad [22]$$

A convolução das funções *x*(*t*) e *h*(*t*) resulta na função *y*(*t*) apresentada pelas sentenças da Equação 23, cujo comportamento é apresentado pela Figura 9.

$$y(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - e^{-2\cdot t}, & 0 \le t < 3 \\ e^{-2\cdot t} \cdot \left(e^6 - 1\right), & t \ge 3 \end{cases} \qquad [23]$$

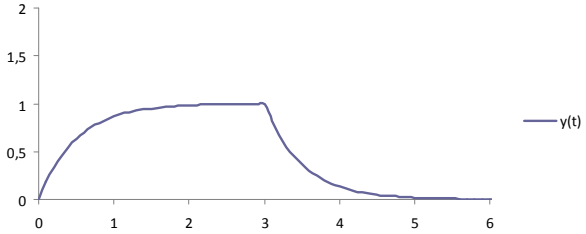


FIGURA 9 – Resultado da convolução dos sinais da Figura 7, obtido na Equação 23.

Observa-se nesta análise que a convolução de um sinal contínuo finito com um sinal contínuo infinito resultou num sinal contínuo infinito. Neste caso, foi necessário o auxílio de gráficos (Figura 8), apresentando a iteração entre os sinais e determinando os limites de integração para realizar a operação de convolução.

4. REALIZANDO A CONVOLUÇÃO DE SINAIS DE TEMPO DISCRETO

Este item apresenta a operação de convolução de sinais de tempo discreto com duração infinita e finita. Para os sinais discretos finitos existem diferentes abordagens para a resolução da convolução.

Um sinal discreto, finito ou infinito, pode ser representado por uma equação ou por sentenças matemáticas, mas também pode ser entendido e interpretado como uma sequência ponderada de impulsos deslocados.

4.1. Convolução de sinais discretos infinitos

A convolução de sinais discretos infinitos, realizada através da definição da convolução discreta, é apresentada pela Equação 5. As funções exemplos a serem convoluídas são apresentadas pelas Equações 24 e 25.

$$x[n]=\left(\frac{1}{4}\right)^{n}\cdot u[n] \qquad [24]$$

$$h[n]=\left(\frac{1}{3}\right)^{n}\cdot u[n] \qquad [25]$$

Os sinais $x[n]$ e $h[n]$ são aplicados na soma de convolução, conforme apresenta a Equação 26.

$$y[n]=x[n]*h[n]$$

$$y[n]=\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\left(\frac{1}{4}\right)^{k}\cdot u[k]\cdot\left(\frac{1}{3}\right)^{n-k}\cdot u[n-k] \qquad [26]$$

A função degrau e a função degrau refletida e deslocada são apresentadas pelas Equações 27 e 28. Fazendo o produto das duas funções, obtém-se a Equação 29.

$$u[k]=\begin{cases}1, & k\geq 0\\ 0, & k<0\end{cases} \qquad [27]$$

$$u[n-k]=\begin{cases}1, & n-k\geq 0\\ 0, & n-k<0\end{cases} \qquad [28]$$

$$u[k]\cdot u[n-k]=\begin{cases}1, & 0\leq k\leq n\\ 0, & \textit{caso contrário}\end{cases} \qquad [29]$$

Como o produto das funções degrau unitário e degrau unitário refletida e deslocada é significativo no intervalo $0\leq k\leq n$, os limites do somatório são alterados, sendo restritos ao intervalo $k = 0$ até n.

A Equação 30 apresenta o desenvolvimento do somatório, que é a operação de convolução discreta.

$$y[n]=\sum_{k=0}^{n}\left(\frac{1}{4}\right)^{k}\cdot\left(\frac{1}{3}\right)^{n-k}$$

$$y[n]=\left(\frac{1}{3}\right)^{n}\cdot\sum_{k=0}^{n}\left(\frac{3}{4}\right)^{k} \qquad [30]$$

A série geométrica é apresentada pela Equação 31.

$$\sum_{n=0}^{N-1}a^{n}=\begin{cases}\dfrac{1-a^{N}}{1-a}, & a\neq 1\\ N, & a=1\end{cases} \qquad [31]$$

Na Equação 30, aplica-se a série geométrica e opera-se algebricamente até obter a expressão do sinal convoluído $y[n]$ na Equação 32.

$$y[n]=\left(\frac{1}{3}\right)^{n}\cdot\frac{1-\left(\frac{3}{4}\right)^{n+1}}{1-\frac{3}{4}}\cdot u[n]$$

$$y[n]=\left(\frac{1}{3}\right)^{n}\frac{\left[1-\left(\frac{3}{4}\right)^{n}\left(\frac{3}{4}\right)\right]}{\frac{1}{4}}\cdot u[n]$$

$$y[n]=4\left[\left(\frac{1}{3}\right)^{n}-\frac{3}{4}\left(\frac{1}{3}\right)^{n}\left(\frac{3}{4}\right)^{n}\right]\cdot u[n]$$

$$y[n]=4\cdot\left(\frac{1}{3}\right)^{n}\cdot u[n]-3\cdot\left(\frac{1}{4}\right)^{n}\cdot u[n] \qquad [32]$$

Observa-se na análise que para sinais discretos infinitos não foi necessário o apoio de nenhum recurso gráfico para auxiliar na realização da operação de convolução.

4.2. Convolução de sinais discretos finitos

A convolução de sinais discretos finitos pode ser realizada através de algumas abordagens interessantes, além da definição apresentada pela Equação 5.

Um sinal discreto pode ser decomposto em uma sequência ponderada de impulsos deslocados. Usando como referência a Figura 1, a função $h(t)$ para sinais contínuos e a função $h[n]$ para sinais discretos são denominadas de **resposta impulsiva do sistema**. Em outras palavras, utilizando um impulso unitário como sendo o sinal de entrada do sistema ($x[n] = \delta[n]$), a saída do sistema será a função $h[n]$, pois $y[n] = x[n] * h[n]$.

Como estamos utilizando sistemas lineares, estes possuem a característica de apresentar uma resposta de saída em função de um sinal de entrada. Sendo aplicado um impulso unitário ao sistema, este vai responder com a resposta impulsiva $h[n]$. Se este impulso for deslocado no tempo, a resposta do sistema em função do sinal de entrada sofrerá o mesmo deslocamento no tempo. Fazendo uso da

decomposição do sinal discreto finito em uma sequência ponderada de impulsos deslocados e da característica da resposta impulsiva, podem ser realizadas duas abordagens para a convolução discreta, apresentadas nos próximos itens.

4.2.1. Convolução discreta com abordagem gráfica da resposta impulsiva

A convolução discreta de sinais finitos realizada pela abordagem gráfica da resposta impulsiva é apresentada através de um exemplo. A Figura 10(a) apresenta o sinal de entrada discreto, enquanto a Figura 10(b) reproduz a resposta impulsiva do sistema, ambas com três amostras. O sinal $x[n]$ pode ser decomposto pelas suas amostras ($x[0] = 2$; $x[1] = 1$; $x[2] = -1$) multiplicadas por impulsos deslocados, apresentado na Equação 33.

$$x[n] = 2 \cdot \delta[n] + 1 \cdot \delta[n-1] - 1 \cdot \delta[n-2] \quad [33]$$

Aplicando a amostra $x[0]$ da Figura 10(c) no sistema $h[n]$, resulta a resposta impulsiva apresentada pela Figura 10(d). De forma semelhante, as Figuras 10(e), 10(f), 10(g) e 10(h) apresentam as respostas impulsivas para as amostras deslocadas $x[1] \cdot \delta[n-1]$ e $x[2] \cdot \delta[n-2]$.

Foi analisado o comportamento do sistema de forma isolada para cada amostra que compõe o sinal de entrada, e que o sinal de entrada corresponde ao somatório destas amostras. Logo, o sinal de saída também corresponde ao somatório das respectivas saídas na Equação 34, pela aplicação do princípio da superposição em sistemas lineares.

$$y[n] = y_0[n] + y_1[n] + y_2[n]$$

$$y[n] = 4 \cdot \delta[n] + 6 \cdot \delta[n-1] + 4 \cdot \delta[n-2] - 2 \cdot \delta[n-4] \quad [34]$$

As Figuras 10(i) e 10(j) apresentam o sinal de entrada e a correspondente convolução discreta.

No exemplo, cada sinal possui três amostras, $L_x = 3$ e $L_h = 3$, resultando numa convolução com cinco amostras pela regra $L_x + L_h - 1$ amostras. A primeira amostra da convolução é $y[0+0] = y[0] = 4$ e a última amostra é $y[2+2] = y[4] = -2$.

Caso os sinais discretos possuam muitas amostras, a análise se alongará, devendo ser realizada para todas as amostras do sinal de entrada.

Nesta abordagem, deve-se determinar a resposta impulsiva para todas as amostras do sinal de entrada, efetuando o somatório destas respostas impulsivas para obter o resultado da convolução.

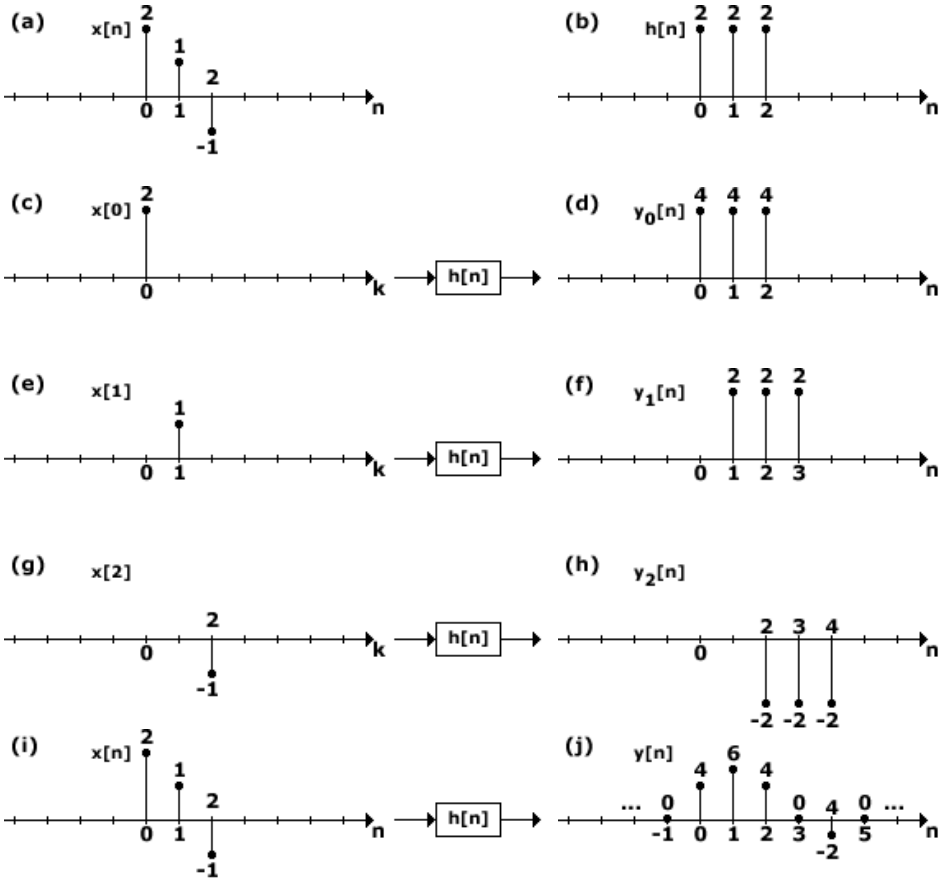


FIGURA 10 – Operação de convolução com sinais discretos finitos, realizada com a abordagem gráfica da resposta impulsiva.

4.2.2. Convolução discreta com abordagem algébrica da resposta impulsiva

Pode-se fazer uso das mesmas propriedades da abordagem anterior para realizar algebricamente a convolução de sinais discretos finitos. Os sinais discretos finitos representados por impulsos ponderados deslocados são apresentados nas Equações 35 e 36.

$$x[n] = 2 \cdot \delta[n] + \delta[n-1] - \delta[n-2] \qquad [35]$$

$$h[n] = 2 \cdot \delta[n] + 2 \cdot \delta[n-1] + 2 \cdot \delta[n-2] \qquad [36]$$

Usando a propriedade da resposta impulsiva, é apresentada na Equação 37 a forma geral do sinal de saída $y[n]$, deslocando-se e ponderando-se a função $h[n]$ em função de cada impulso componente do sinal de entrada $x[n]$.

$$y[n] = x[n] * h[n]$$

$$y[n] = 2 \cdot (h[n]) + (h[n-1]) - (h[n-2]) \qquad [37]$$

Substituindo-se a função $h[n]$ original em cada parcela ponderada e deslocada da função de saída, obtêm-se as Equações 38, 39 e 40. Aplicando-se o princípio da superposição nestes resultados parciais obtém-se o resultado da convolução na Equação 41.

$$y[n] = y_0[n] + y_1[n] + y_2[n]$$

$y_0[n] = 2 \cdot h[n] =$	$4 \cdot \delta[n]$	$+4 \cdot \delta[n-1]$	$+4 \cdot \delta[n-2]$			[38]
$y_1[n] = h[n-1] =$		$+2 \cdot \delta[n-1]$	$+2 \cdot \delta[n-2]$	$+2 \cdot \delta[n-3]$		[39]
$y_2[n] = -h[n-2] =$			$-2 \cdot \delta[n-2]$	$-2 \cdot \delta[n-3]$	$-2 \cdot \delta[n-4]$	[40]
$y[n] =$	$4 \cdot \delta[n]$	$+6 \cdot \delta[n-1]$	$+4 \cdot \delta[n-2]$	$+0 \cdot \delta[n-3]$	$-2 \cdot \delta[n-4]$	[41]

Como foram utilizados os mesmos sinais do item 4.2.1 para realizar esta abordagem de convolução discreta, chega-se ao mesmo resultado, com a representação na forma algébrica dos sinais através de impulsos ponderados e deslocados.

Nesta abordagem, foram utilizadas as mesmas propriedades da abordagem anterior, sendo realizada a convolução de forma algébrica, ao invés da forma gráfica.

Na mesma situação do item anterior, caso os sinais discretos possuam muitas amostras, a análise será mais demorada, devendo ser realizada a operação com todas as amostras do sinal de entrada para se obter o resultado da convolução.

4.2.3. Convolução discreta usando a definição

A operação de convolução com sinais discretos foi definida na Equação 5. No processo de resolução, seguem-se os mesmos passos da convolução discreta, diferindo apenas na forma de representação dos sinais.

Nesta abordagem também foram utilizados os mesmos sinais dos dois itens anteriores. Nas Figuras 11(a) e 11(b) são apresentados os sinais $x[n]$ e $h[n]$. A Figura 11(c) e a Figura 11(d) mostram os sinais preparados para realizar a convolução, efetuando a troca de variáveis, a reflexão e o deslocamento do sinal $x[n]$ e do sinal $h[n]$.

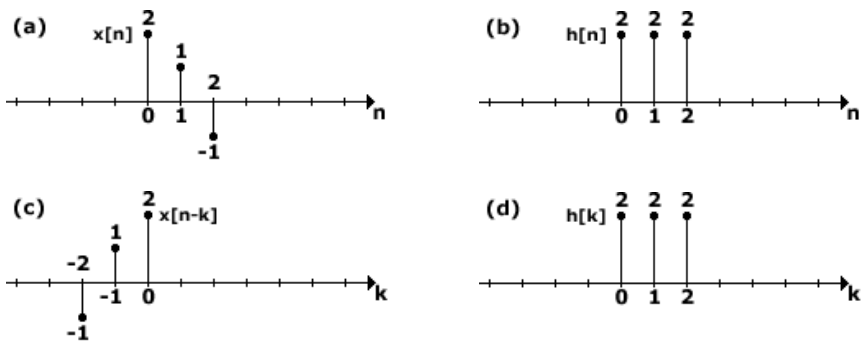


FIGURA 11 – Sinais preparados para uso no exemplo de convolução discreta com sinais finitos.

No instante $n = -1$, apresentado pela Figura 12(a), ainda não ocorreu a sobreposição dos sinais, resultando em valor *0* para a convolução.

A Figura 12(b) apresenta a situação dos sinais no instante $n = 0$, ocorrendo a convolução com uma amostra. Efetuando o somatório dos produtos parciais obtém-se a convolução para este instante, sendo $y[0] = 4$. As Figuras 12(c), 12(d), 12(e) e 12(f) apresentam os demais instantes onde ocorre a convolução com $y[1] = 6$, $y[2] = 4$, $y[3] = 0$ e $y[4] = -2$. No instante $n = 5$, apresentado pela Figura 12(g), a convolução terminou, não havendo sobreposição de amostras dos sinais.

Como era esperado, observa-se que o resultado da convolução com esta abordagem apresenta o mesmo resultado que as duas abordagens anteriores.

Vê-se nesta abordagem, diferente das duas anteriores, que o resultado da convolução para cada instante é obtido realizando-se a convolução naquele instante, independente do cálculo da convolução nos instantes anteriores e posteriores. Essa é uma característica da abordagem que permite operar com sinais com muitas amostras ou com sinais infinitos e calcular a operação de convolução para cada instante de tempo discreto *n*.

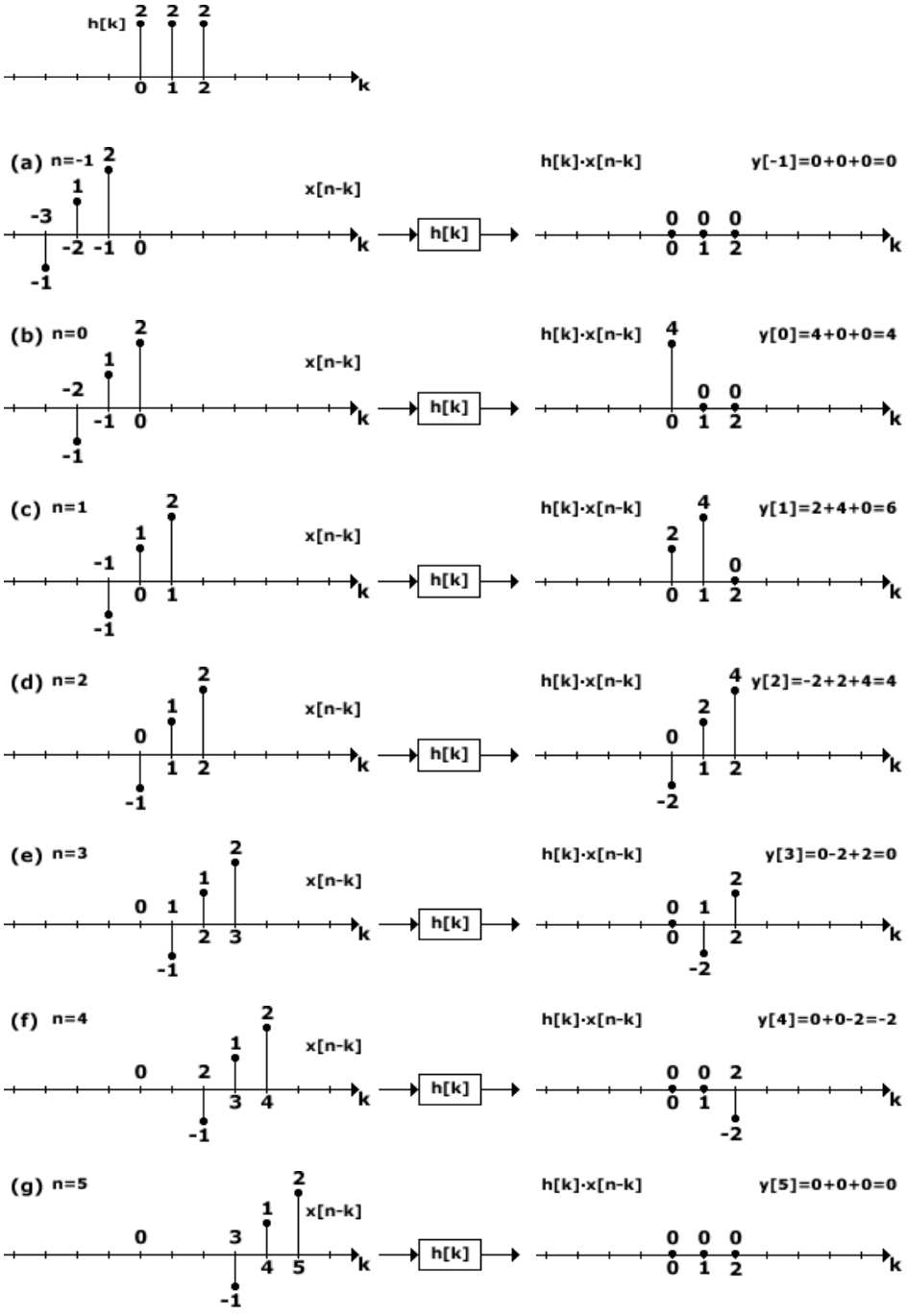


FIGURA 12 – Operação de convolução com sinais discretos finitos, realizada utilizando a definição de convolução discreta.

Lathi (2004) e Hayes (1999) apresentam um artifício criativo, através de uma tira de papel, para agilizar a realização da operação para sinais discretos fazendo uso da definição de convolução. Fica a indicação para o leitor interessado.

4.3. Convolução de sinal discreto finito com sinal discreto infinito

A convolução de um sinal discreto finito com um sinal discreto infinito pode ser resolvida pela definição da convolução discreta ou pela ideia da resposta impulsiva.

As funções exemplo estão apresentadas nas Equações 42 e 43 e os comportamentos das funções nas Figuras 13(a) e 13(b).

$$h[n] = u[n] - u[n-4] \qquad [42]$$

$$x[n] = 0{,}9^n \cdot u[n] \qquad [43]$$

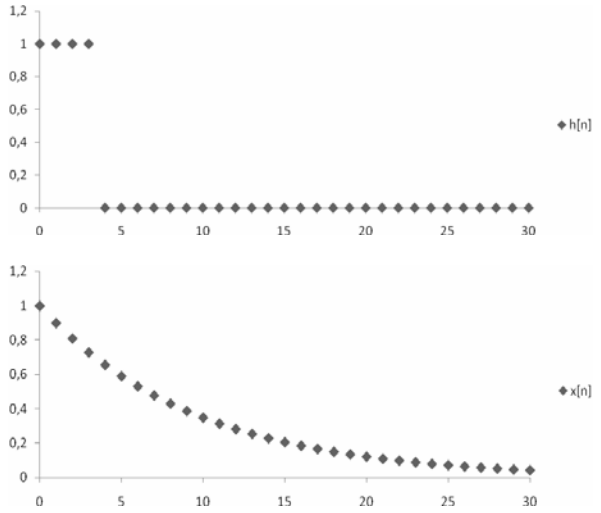


FIGURA 13 – Sinais discretos finito *h*[*n*] e infinito *x*[*n*], das Equações 42 e 43.

Aplicando a definição da convolução discreta, observa-se que a função *h*[*n*] é composta por uma sequência finita de impulsos unitários, definindo duas análises. No intervalo $0 \le n \le 3$ tem-se uma análise para a convolução, e no intervalo $n \ge 3$, tem-se outra análise, conforme apresenta a Equação 44.

$$y[n] = x[n] * h[n]$$

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x[k] \cdot h[n-k]$$

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} 0{,}9^k u[k].\{u[n-k] - u[n-k-4]\}$$

$$y[n] = \sum_{k=0}^{n} 0{,}9^k \;, \quad 0 \le n \le 3$$

$$y[n] = \frac{1-0{,}9^{n+1}}{1-0{,}9} \;, \quad 0 \le n \le 3$$

$$y[n] = \sum_{k=n-3}^{n} 0{,}9^k \;, \quad n \ge 3$$

$$y[n] = \left(\frac{1-0{,}9^4}{1-0{,}9}\right).0{,}9^{n-3} \;, \quad n \ge 3 \qquad [44]$$

O resultado da convolução, da Equação 44, é apresentado pela Figura 14.

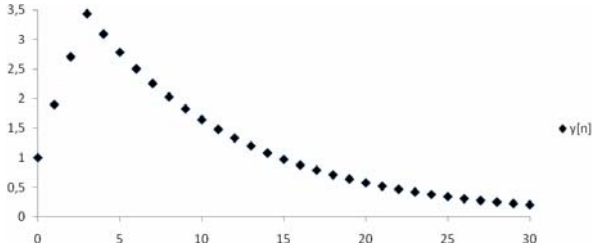


FIGURA 14 – Comportamento da convolução *y*[*n*] entre o sinal discreto finito e o sinal discreto infinito, apresentados pela Figura 13.

Como o sinal *h*[*n*] possui um número pequeno de amostras, a convolução discreta pela abordagem da resposta impulsiva também pode ser aplicada neste exemplo.

5. TRANSFORMADAS

Após apresentar a definição e exemplos da operação de convolução para sinais de tempo contínuo e de tempo discreto, não é possível dizer que a convolução seja uma operação simples de ser entendida e de ser executada, também não é difícil, mas é trabalhosa.

Outra abordagem matemática para resolver a operação de convolução é o uso das transformadas, que estão relacionadas com a solução do problema em outro domínio de representação.

A aplicação das transformadas neste contexto é para obter o resultado da operação de convolução, sem resolvê-la diretamente. Através das transformadas, transporta-se o problema para um outro domínio de representação, no qual a operação de convolução também será transformada, possuindo uma solução algébrica mais simples. Dependendo do tipo do sinal que está sendo utilizado e da aplicação, determina-se qual a transformada a ser utilizada: transformada de Laplace, transformada de Fourier ou transformada Z.

5.1. Transformada de Laplace e a convolução

A transformada de Laplace relaciona dois domínios de representação: domínio do tempo contínuo *t* e domínio da frequência complexa *s*,

sendo s uma variável complexa ($s = \sigma + j\omega$) (operador imaginário: $j = i = \sqrt{-1}$).

A transformada de Laplace, definida na Equação 45, transforma a função do domínio do tempo $x(t)$, para o domínio da frequência, resultando na função $X(s)$.

$$X(s) = L\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-s \cdot t} \cdot dt \qquad [45]$$

A antitransformada de Laplace ou transformada inversa de Laplace, definida na Equação 46, transforma a função $X(s)$ do domínio da frequência, para o domínio do tempo, resultando na função $x(t)$.

$$x(t) = L^{-1}\{X(s)\}$$

$$L^{-1}\{X(s)\} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot j} \cdot \int_{c-j\cdot\infty}^{c+j\cdot\infty} X(s) \cdot e^{s \cdot t} \cdot ds \qquad [46]$$

Dentre as propriedades da transformada de Laplace, limitando-se ao contexto deste trabalho, destacam-se as duas propriedades envolvendo a operação de convolução.

A propriedade da convolução no domínio do tempo é apresentada pela Equação 47. A operação de convolução de duas funções no domínio do tempo é transformada para o domínio da frequência como sendo a multiplicação entre as transformadas das funções.

$$x(t) * w(t) \xleftrightarrow{L} X(s) \cdot W(s) \qquad [47]$$

A propriedade dual é a propriedade da convolução no domínio da frequência, apresentada pela Equação 48. A operação de convolução entre duas funções no domínio da frequência é transformada para o domínio do tempo como sendo a multiplicação das transformadas inversas destas funções.

$$x(t) \cdot w(t) \xleftrightarrow{L} \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot j} \cdot X(s) * W(s) \qquad [48]$$

Nas duas propriedades, observa-se que a operação de convolução realizada num domínio transforma-se na operação de multiplicação no outro domínio. Desta forma, para não resolver diretamente a operação de convolução, executa-se a transformada dos sinais para o outro domínio, resolve-se o problema e retorna-se a solução para o domínio inicial executando a transformada inversa.

5.2. Transformada de Fourier e a convolução

A transformada de Fourier relaciona o domínio do tempo contínuo t com o domínio da frequência $j\omega$ (operador imaginário: $j = i = \sqrt{-1}$).

A definição da transformada de Fourier é apresentada pela Equação 49, transformando a função do domínio do tempo $x(t)$ para o domínio da frequência, resultando na função $X(j\omega)$.

$$X(j\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} \cdot dt \qquad [49]$$

A transformada inversa de Fourier ou anti-transformada, definida na Equação 50, transforma a função $X(j\omega)$ do domínio da frequência, para o domínio do tempo, obtendo a função $x(t)$.

$$x(t) = F^{-1}\{X(j\omega)\}$$

$$F^{-1}\{X(j\omega)\} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} X(j\omega) \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \cdot d\omega \qquad [50]$$

Destacam-se apenas as duas propriedades da transformada de Fourier que envolvem a operação de convolução.

A propriedade da convolução no domínio do tempo é apresentada pela Equação 51. A operação de convolução de duas funções no domínio do tempo é transformada para o domínio da frequência como sendo a operação de multiplicação entre as transformadas das funções.

$$x(t) * w(t) \xleftrightarrow{F} X(j\omega) \cdot W(j\omega) \qquad [51]$$

A propriedade dual é a propriedade da convolução no domínio da frequência, apresentada pela Equação 52. A operação de convolução entre duas funções no domínio da frequência é transformada para o domínio do tempo como sendo a multiplicação das transformadas inversas destas funções.

$$x(t) \cdot w(t) \xleftrightarrow{F} \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot X(j\omega) * W(j\omega) \qquad [52]$$

Nas duas propriedades, observa-se que a operação de convolução realizada num domínio transforma-se na operação de multiplicação no outro domínio. Desta forma, para não resolver diretamente a operação de convolução, executa-se a transformada dos sinais para o outro domínio, resolve-se o problema e retorna-se com a solução para o domínio inicial executando a transformada inversa.

5.3. Transformada Z e a convolução

A transformada Z é a transformada equivalente da transformada de Laplace operando em tempo discreto sobre funções e variáveis discretas. A definição da transformada é apresentada pela Equação 53, com $z = r \cdot e^{j\omega}$, sendo z uma variável complexa (operador imaginário: $j = i = \sqrt{-1}$).

$$X[z] = Z\{x[n]\} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot z^{-n} \qquad [53]$$

Semelhante às outras transformadas apresentadas, a propriedade de interesse envolve a operação de convolução. A propriedade da convolução mostra que a operação de convolução de duas funções no domínio do tempo discreto é transformada para o domínio *Z* como uma operação de multiplicação entre as transformadas das funções, conforme apresenta a Equação 54.

$$x[n] * w[n] \xleftrightarrow{Z} X[z] \cdot W[z] \qquad [54]$$

6. REALIZANDO A CONVOLUÇÃO COM TRANSFORMADAS

Este item apresenta a operação de convolução resolvida através das transformadas de Laplace, de Fourier e Z. A propriedade da convolução dos sinais no tempo corresponde ao produto das transformadas dos sinais. Para fazer uso desta propriedade, determinam-se as transformadas dos sinais, representando o problema no domínio da transformada. Fazendo uso da convolução executa-se o produto das transformadas e determina-se a transformada inversa com a solução da convolução.

6.1. Convolução com a transformada de Laplace

Fazendo uso dos mesmos exemplos de sinais contínuos infinitos que foram utilizados na Figura 2, realiza-se a operação de convolução através da transformada de Laplace.

Nas Equações 55 e 56, apresentam-se as funções exemplo a serem convoluídas. As Equações 57, 58 e 59 apresentam um par de transformada de Laplace e duas propriedades. As propriedades de linearidade e de convolução e o par de transformada de Laplace podem ser encontrados nas referências.

$$x(t) = 2 \cdot e^{-t} \cdot u(t) \qquad [55]$$

$$h(t) = e^{-3 \cdot t} \cdot u(t) \qquad [56]$$

$$e^{-a \cdot t} \cdot u(t) \xleftrightarrow{L} \frac{1}{s+a} \qquad [57]$$

$$a \cdot x(t) + b \cdot w(t) \xleftrightarrow{L} a \cdot X(s) + b \cdot W(s) \qquad [58]$$

$$x(t) * w(t) \xleftrightarrow{L} X(s) \cdot W(s) \qquad [59]$$

Aplicando-se as propriedades e a transformada nos sinais no domínio do tempo, obtém-se a transformada de Laplace dos sinais nas Equações 60 e 61.

$$X(s) = \frac{2}{s+1} \qquad [60]$$

$$H(s) = \frac{1}{s+3} \qquad [61]$$

O resultado da convolução utilizando a transformada de Laplace é caracterizado pelo produto das Equações 60 e 61, apresentado na Equação 62. Utilizando a ferramenta de frações parciais (ver Lathi, 2004) na Equação 62, decompõe-se a fração do polinômio de segundo grau em duas frações de polinômios de primeiro grau (Equação 63), que possuem como transformada inversa o par de transformada da Equação 57.

$$Y(s) = X(s) \cdot H(s)$$

$$Y(s) = \frac{2}{(s+1) \cdot (s+3)} \qquad [62]$$

$$Y(s) = \frac{1}{s+1} + \frac{-1}{s+3} \qquad [63]$$

O resultado obtido na Equação 63 está no domínio da transformada de Laplace e deve ser convertido para o domínio do tempo, resultando na função $y(t)$, utilizando-se o procedimento do cálculo da transformada inversa na Equação 64.

$$y(t) = L^{-1}\{Y(s)\}$$

$$y(t) = L^{-1}\left\{\frac{1}{s+1} + \frac{-1}{s+3}\right\}$$

$$y(t) = L^{-1}\left\{\frac{1}{s+1}\right\} + L^{-1}\left\{\frac{-1}{s+3}\right\}$$

$$y(t) = e^{-t} \cdot u(t) - e^{-3 \cdot t} \cdot u(t)$$

$$y(t) = \left(e^{-t} - e^{-3 \cdot t}\right) \cdot u(t) \qquad [64]$$

Como foram utilizadas as mesmas funções da Figura 2, é esperado obter o mesmo resultado para a convolução. Os gráficos dos sinais $x(t)$, $h(t)$ e do resultado $y(t)$ podem ser visualizados na Figura 3.

Observa-se que não foi necessário o apoio de nenhum gráfico para resolver a convolução utilizando-se a transformada de Laplace, e que devido ao uso das propriedades, a convolução no domínio do tempo contínuo foi transformada em uma multiplicação no domínio da frequência.

6.2. Convolução com a transformada de Fourier

Utilizando os mesmos exemplos de sinais contínuos infinitos que foram utilizados na Figura 2, realiza-se a operação de convolução através da transformada de Fourier.

Nas Equações 65 e 66, apresentam-se as funções exemplo a serem convoluídas. As Equações 67, 68 e 69 apresentam um par de transformada de Fourier e duas propriedades. As propriedades de linearidade e de convolução e o par de transformada de Fourier podem ser encontrados nas referências.

$$x(t) = 2 \cdot e^{-t} \cdot u(t) \quad [65]$$

$$h(t) = e^{-3 \cdot t} \cdot u(t) \quad [66]$$

$$e^{-a \cdot t} \cdot u(t) \overset{F}{\longleftrightarrow} \frac{1}{a + j \cdot \omega} \quad [67]$$

$$a \cdot x(t) + b \cdot w(t) \overset{F}{\longleftrightarrow} a \cdot X(j\omega) + b \cdot W(j\omega) \quad [68]$$

$$x(t) * w(t) \overset{L}{\longleftrightarrow} X(j\omega) \cdot W(j\omega) \quad [69]$$

Aplicando-se as propriedades e a transformada nos sinais no domínio do tempo, obtém-se a transformada de Fourier dos sinais nas Equações 70 e 71.

$$X(j\omega) = \frac{2}{1 + j \cdot \omega} \quad [70]$$

$$H(j\omega) = \frac{1}{3 + j \cdot \omega} \quad [71]$$

O resultado da convolução no domínio da transformada de Fourier é caracterizado pelo produto das Equações 70 e 71, apresentado na Equação 72. Utilizando-se a ferramenta de frações parciais (Lathi, 2004) na Equação 72, decompõe-se a fração do polinômio de segundo grau em duas frações de polinômios de primeiro grau (Equação 73), que possuem como transformada inversa o par de transformada da Equação 67.

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega)$$

$$Y(j\omega) = \frac{2}{(1 + j \cdot \omega) \cdot (3 + j \cdot \omega)} \quad [72]$$

$$Y(j\omega) = \frac{1}{1 + j \cdot \omega} + \frac{-1}{3 + j \cdot \omega} \quad [73]$$

O resultado obtido na Equação 73 está no domínio da transformada de Fourier e deve ser convertido para o domínio do tempo, resultando na função $y(t)$, utilizando-se o procedimento do cálculo da transformada inversa na Equação 74.

$$y(t) = F^{-1}\{Y(j\omega)\}$$

$$y(t) = F^{-1}\left\{\frac{1}{1 + j \cdot \omega} + \frac{-1}{3 + j \cdot \omega}\right\}$$

$$y(t) = F^{-1}\left\{\frac{1}{1 + j \cdot \omega}\right\} + F^{-1}\left\{\frac{-1}{3 + j \cdot \omega}\right\}$$

$$y(t) = e^{-t} \cdot u(t) - e^{-3 \cdot t} \cdot u(t)$$

$$y(t) = \left(e^{-t} - e^{-3 \cdot t}\right) \cdot u(t) \quad [74]$$

Como foram utilizadas as mesmas funções da Figura 2, é esperado obter o mesmo resultado para a convolução. Os gráficos dos sinais $x(t)$, $h(t)$ e do resultado $y(t)$ podem ser visualizados na Figura 3.

Observa-se que não foi necessário o apoio de nenhum gráfico para resolver a convolução através do uso da transformada de Fourier. Devido ao uso da propriedade de convolução no domínio do tempo a convolução no tempo contínuo foi transformada em uma multiplicação no domínio da frequência. Mas para resolver a convolução pela transformada de Fourier é necessário utilizar a tabela de pares de transformadas de Fourier e a tabela de propriedades, que podem ser encontrados nas referências.

6.3. Convolução com a transformada Z

Utilizando os mesmos sinais discretos infinitos das Equações 24 e 25, realiza-se a operação de convolução através da transformada Z. As Equações 75 e 76 apresentam as funções a serem convoluídas. As Equações 77, 78 e 79 apresentam um par de transformada Z e duas propriedades (linearidade e convolução). As propriedades e o par de transformada Z podem ser encontrados nas referências.

$$x[n] = \left(\frac{1}{4}\right)^n \cdot u[n] \quad [75]$$

$$h[n] = \left(\frac{1}{3}\right)^n \cdot u[n] \quad [76]$$

$$a^n \cdot u[n] \overset{Z}{\longleftrightarrow} \frac{z}{z - a} \quad [77]$$

$$a \cdot x[n] + b \cdot w[n] \overset{Z}{\longleftrightarrow} a \cdot X(z) + b \cdot W(z) \quad [78]$$

$$x[n] * w[n] \overset{Z}{\longleftrightarrow} X(z) \cdot W(z) \quad [79]$$

Aplicando-se as propriedades e a transformada nos sinais no domínio do tempo, obtém-se a transformada Z dos sinais nas Equações 80 e 81.

$$X(z) = \frac{z}{z - 1/4} \quad [80]$$

$$H(z) = \frac{z}{z - 1/3} \quad [81]$$

O resultado da convolução em Z é caracterizado pelo produto das Equações 80 e 81, apresentado na Equação 82. Utilizando-se a ferramenta de frações parciais (ver Lathi, 2004) na Equação 82, decompõe-se a fração do polinômio de segundo grau em duas frações de polinômios de primeiro grau (Equação 83), que possuem como transformada inversa o par de transformada da Equação 77.

$$Y(z) = X(z) \cdot H(z)$$

$$Y(z) = \frac{z^2}{\left(z - \frac{1}{4}\right) \cdot \left(z - \frac{1}{3}\right)} \quad [82]$$

$$Y(z) = \frac{-3 \cdot z}{z - 1/4} + \frac{4 \cdot z}{z - 1/3} \quad [83]$$

O resultado obtido na Equação 83 está no domínio da transformada Z e deve ser convertido para o domínio do tempo discreto, resultando na função *y*[*n*], utilizando-se o procedimento do cálculo da transformada inversa na Equação 84.

$$y[n] = Z^{-1}\{Y(z)\}$$

$$y[n] = Z^{-1}\left\{\frac{-3 \cdot z}{z - 1/4} + \frac{4 \cdot z}{z - 1/3}\right\}$$

$$y[n] = Z^{-1}\left\{\frac{-3 \cdot z}{z - 1/4}\right\} + Z^{-1}\left\{\frac{4 \cdot z}{z - 1/3}\right\}$$

$$y[n] = -3 \cdot \left(\frac{1}{4}\right)^n \cdot u[n] + 4 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^n \cdot u[n]$$

$$y[n] = \left[4 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^n - 3 \cdot \left(\frac{1}{4}\right)^n\right] \cdot u[n] \quad [84]$$

Como foram utilizadas as mesmas funções das Equações 24 e 25, é esperado obter-se o mesmo resultado para a convolução. O resultado da convolução obtido na Equação 32 coincide com o resultado obtido na Equação 84.

Observa-se que não foi necessário o apoio de nenhum gráfico para resolver a convolução através do uso da transformada Z, e devido ao uso da propriedade de convolução no domínio do tempo a convolução no tempo discreto foi transformada em uma multiplicação no domínio Z. Porém, para resolver a convolução pela transformada Z, é necessário utilizar a tabela de pares de transformadas Z e a tabela de propriedades, disponíveis nas referências.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A operação de convolução é muito utilizada em processamento de sinais na engenharia elétrica, sendo abordada em uma disciplina introdutória de sinais e sistemas e amplamente utilizada em disciplinas de controle, teoria de comunicações e processamento de sinais.

Neste trabalho foi abordada a convolução em tempo contínuo e a convolução em tempo discreto, por serem as mais comumente utilizadas.

Através de exemplos numéricos pode-se observar que a operação de convolução não é uma operação fácil de ser executada, mesmo utilizando-se sinais ou funções elementares ou simples.

Foi observado também que, para os tipos de sinais apresentados, a convolução pode ser resolvida pela sua definição matemática, pela integral de convolução ou soma de convolução, dependendo do sinal ser de tempo contínuo ou de tempo discreto.

Através de exemplos numéricos foram abordados diversos métodos para resolver a operação de convolução, procurando apresentar a diversidade de ferramentas matemáticas disponíveis. Para determinados tipos de sinais, além da solução pela definição da operação, a convolução pode ser resolvida por outras abordagens, como a resposta impulsiva do sistema.

O uso das transformadas de Laplace ou de Fourier, para sinais de tempo contínuo, ou da transformada Z, para sinais de tempo discreto, permite, através das suas propriedades, transformar a operação de convolução em uma operação de multiplicação, facilitando e agilizando a resolução da convolução.

Como já citado, a operação de convolução é a operação mais utilizada em processamento de sinais. Por isso é importante compreender e saber resolver esta operação, independente da ferramenta matemática utilizada.

REFERÊNCIAS

HAYES, M.H. **Schaum's outline: digital signal processing**. The McGraw-Hill Companies: New York, 1999.

LATHI, B.P. **Linear systems and signals**. Oxford University Press, 2a ed., 2004.

Artigo disponibilizado *on-line*

Revista Ilha Digital

Endereço eletrônico:
http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/

TUTORIAL TÉCNICO: O TEMPORIZADOR 555

Charles Borges de Lima[1]

Resumo: O 555 é um circuito integrado versátil e simples muito utilizado em eletrônica, sendo empregado em inúmeras aplicações, principalmente para a temporização e a geração de sinais com frequência variável. Apesar de o 555 ter aproximadamente 40 anos, sua simplicidade ainda o faz muito popular em projetos eletrônicos. Este artigo é um tutorial explicando sua história, princípio de funcionamento, formas de utilização e apresentando alguns circuitos exemplos. Conclui-se o artigo com uma série de circuitos implementáveis com o 555, demonstrando sua grande utilidade aos estudantes e projetistas de circuitos eletrônicos.

Palavras-chave: 555. Astável. Monoestável. Temporização.

***Abstract**: The 555 is a versatile and simple integrated circuit very useful in electronics, it is employed in many designs, especially for timing and signal generation with variable frequency. Despites having approximately 40 years old, its simplicity still make it very popular in electronics projects. This paper is a tutorial explaining its history, how it works, how to use it and some example circuits. The article also shows a series of circuits using the 555, showing its great importance to students and designers of electronic circuits.*

***Keywords**: 555. Astable. Monostable. Timing.*

[1] Professor do DAELN (Departamento Acadêmico de Eletrônica) campus Florianópolis, IF-SC <cborges@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

O circuito integrado 555 é um temporizador de uso geral, amplamente utilizado em eletrônica, com baixo custo e alta versatilidade. Foi introduzido no início da década de 70 pela *Signetic Corporation* como SE555/NE555 e era chamado de "Máquina do Tempo" (*The IC Time Machine*), também foi o primeiro circuito integrado temporizador disponível. Na Figura 1, é apresentado o NE555 em uma de suas primeiras versões.

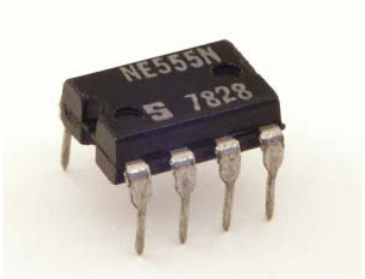


FIGURA 1 – NE555.

Fonte: YOREPARO, 2010.

O 555 é produzido por inúmeros fabricantes, os quais agregam características próprias ao CI, tais como, diferentes encapsulamentos, frequências, tensões e correntes de trabalho. A Tabela 1 mostra os principais fabricantes do 555 com algumas de suas nomenclaturas.

TABELA 1 – Fabricantes do 555.

Fabricante	Código
Diodes Incorporated	ZSCT1555N8TA
Fairchild Semiconductor	LM555CN NE555N SA555D
Intersil Semiconductors	ICM7555IBAZ
Maxim Integrated	ICM7555ISA
Micrel Incorporated	MIC1557YM5
National Semiconductors	LM555CMX
NJR (New Japan Radio)	NJM555D-ND
NXP Semiconductors	ICM7555CD
ON Semiconductors	MC1455P1G
ST Microelectronics	NE555DT TS555CDT NE555DR
Texas Instruments	TLC551CP TLC555IDR
Zilog Incorporated	ZSBI050PZ000SC

Os fabricantes disponibilizam componentes com tensões de alimentação na faixa de 0,9 até 18 V, frequências de trabalho de até 5 MHz e correntes de saída que podem chegar a 200 mA. Como pode operar com tensões baixas, o 555 é adequado para o trabalho com baterias e modernos circuitos digitais. Isso também é balizado pelos modernos 555 que necessitam de correntes na ordem de µA para operação.

O 555 pode ser utilizado em circuitos monoestáveis ou astáveis (osciladores), com períodos que podem variar de microssegundos até vários minutos. Por sua capacidade no fornecimento de corrente, pode acionar diretamente cargas, tais como: relés, pequenos motores e LEDs de potência.

Existem CIs com múltiplos 555 em um único encapsulamento, como o 556, com dois, e o 558 com 4. Os fabricantes disponibilizam diferentes tipos de encapsulamentos, desde os tradicionais PTH (*Plated Through-Hole*) até os SMDs (*Surface Mount Devices*). Na Figura 2 são apresentados os encapsulamentos DIP (*Dual In line Package*) e SO (*Small-Outline*), com 8 pinos cada.

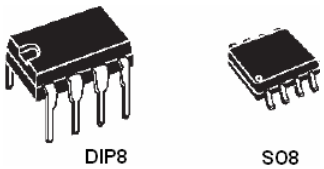


FIGURA 2 – Encapsulamentos DIP8 e SO8 para o 555.

Fonte: ST MICROELECTRONICS, 2010.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O 555 possui 8 pinos como pode ser observado na Figura 3, sendo composto basicamente por dois comparadores, um *Flip-Flop* SR (*Set-Reset*), um estágio de saída e uma rede resistiva com três resistores iguais de 5 kΩ (daí o nome de 555).

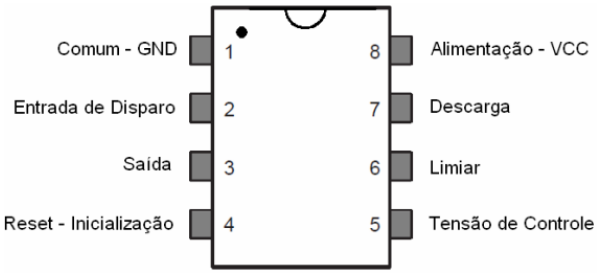


FIGURA 3 – Pinagem do 555.

Um diagrama simplificado é apresentado na Figura 4. Um diagrama completo, o NE555 da ST Microelectronics, é composto por 24 transistores, 17 resistores e 2 diodos, como pode ser visto na Figura 5. Nesta, pode-se notar a simplicidade interna do 555.

O 555 é o resultado de uma combinação de comparadores lineares (Amplificadores Operacionais – AMPOPs) (PERTENCE JR, 2003) e um *Flip-Flop* SR (TOCCI, 2008), conforme mostrado na Figura 4.

Uma conexão em série de três resistores determina os valores das tensões de referência para os dois comparadores (2/3 VCC e 1/3 VCC). A saída desses comparadores habilita ou desabilita o *Flip-Flop*. A saída deste é aplicada a um estágio amplificador de saída (AMPOP de ganho unitário). O *Flip-Flop* também opera um transistor dentro do CI, que tem a função de descarregar o capacitor de temporização.

Como será visto, o processo de temporização é baseado no tempo de carga e descarga de um capacitor externo, adequadamente conectado ao 555.

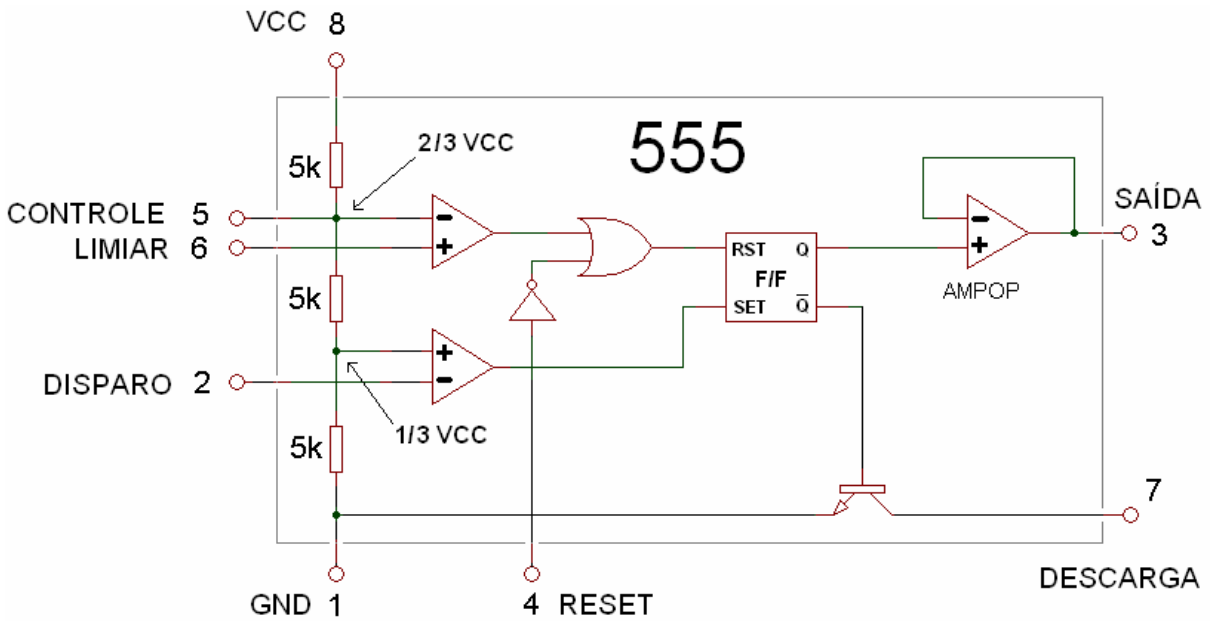


FIGURA 4 – Diagrama esquemático simplificado do 555.

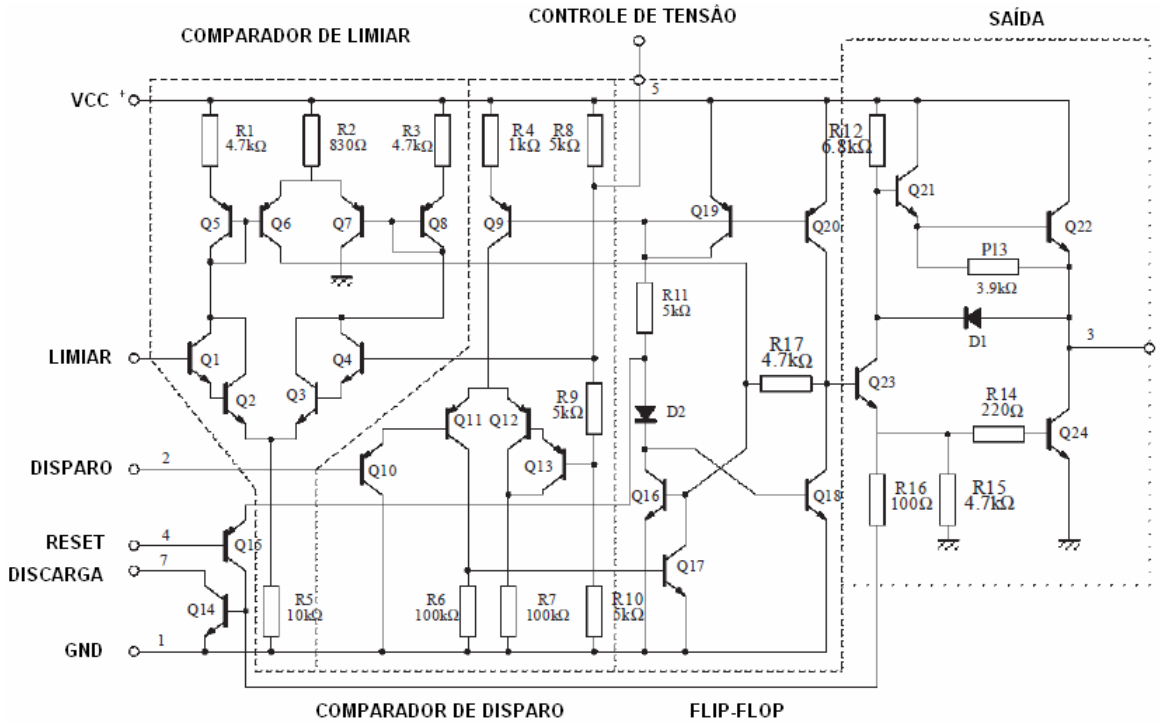


FIGURA 5 – Diagrama esquemático completo do 555.

Fonte: ST MICROELECTRONICS, 2010.

2.1. Descrição dos pinos

Pino 1 (GND): Pino de terra ou ponto comum à alimentação.

Pino 2 (Disparo): É a entrada do comparador com referência de 1/3 VCC, sendo usado para ativar o *Flip-Flop* SR ($Q=1$ e $\overline{Q}=0$). Quando a tensão nesse pino é menor que 1/3 VCC, ou menor que metade da tensão que aparece no pino 5, a saída vai para o estado alto. Como a ação do pino de disparo é sensível ao nível de tensão nele aplicado, a tensão de disparo pode variar lentamente. O pulso de disparo deve ser de duração menor que o intervalo de tempo determinado pela resistência e capacitância externa. Se o pino é mantido em nível baixo por um tempo maior, a saída permanecerá em nível alto até que a tensão seja corrigida.

Pino 3 (Saída): É a saída do sinal temporizado, o qual é amplificado para poder fornecer corrente à carga.

Pino 4 (*Reset*): Usado para inicializar o *Flip-Flop* e retornar a saída ao estado zero ($Q=0$) e acionar o transistor de descarga ($\overline{Q}=1$). O pino é ativo quando a tensão aplicada estiver em nível lógico zero. Caso o *reset* não seja utilizado, esse pino deve ser conectado ao VCC para evitar qualquer inicialização indevida.

Pino 5 (Tensão de Controle): Esse pino permite o acesso direto ao ponto do divisor de tensão com 2/3 VCC. O uso desse pino é opcional, entretanto, possibilita uma grande flexibilidade na mudança do período de temporização. É recomendado o uso de um pequeno capacitor cerâmico (0,01 μF) entre esse pino e o GND para aumentar a imunidade do CI ao ruído e eliminar um indesejável disparo.

Pino 6 (Limiar): é a entrada para o comparador que tem uma tensão de 2/3 VCC como referência. É esse comparador que irá inicializar o *Flip-Flop*. Uma inicialização através desse terminal implica uma entrada de tensão superior a 2/3 VCC ou uma tensão aplicada no pino 5.

Pino 7 (Descarga): é ligado a um transistor NPN com coletor aberto. Quando esse pino é acionado, o transistor funciona como uma chave e o coletor é conectado à referência. É usado para descarregar o capacitor associado a esse pino.

Pino 8 (VCC): É o pino de alimentação do CI onde será conectado o terminal positivo da fonte de tensão.

2.2. Operação astável (oscilador)

O modo de operação astável produz uma saída digital com uma determinada frequência. Nesse modo de operação, um capacitor é constantemente carregado e descarregado, sendo utilizados os comparadores internos do CI para o disparo de saída e descarga do capacitor, gerando um sinal com ciclo alto e baixo ajustável. A Figura 6 ilustra a utilização do 555 em modo astável.

O capacitor C carrega-se, tendendo ao valor de VCC, através dos resistores externos R_A e R_B. A tensão do capacitor aumenta até ultrapassar

2/3 VCC. Essa tensão é o limiar do pino 6, que leva o seu comparador a disparar o *reset* do *Flip-Flop*, colocando a saída do pino 3 em nível lógico baixo. Além disso, o transistor de descarga é ligado, fazendo com que o capacitor seja descarregado através de R_B pelo pino 7. A tensão do capacitor diminui até cair abaixo do valor de disparo (1/3 VCC). O *Flip-Flop* é acionado, então a saída retorna ao nível lógico alto e o transistor de descarga é desligado. O capacitor pode, então, ser novamente carregado e o processo é repetido. A tensão do capacitor ficará entre 1/3 VCC e 2/3 VCC.

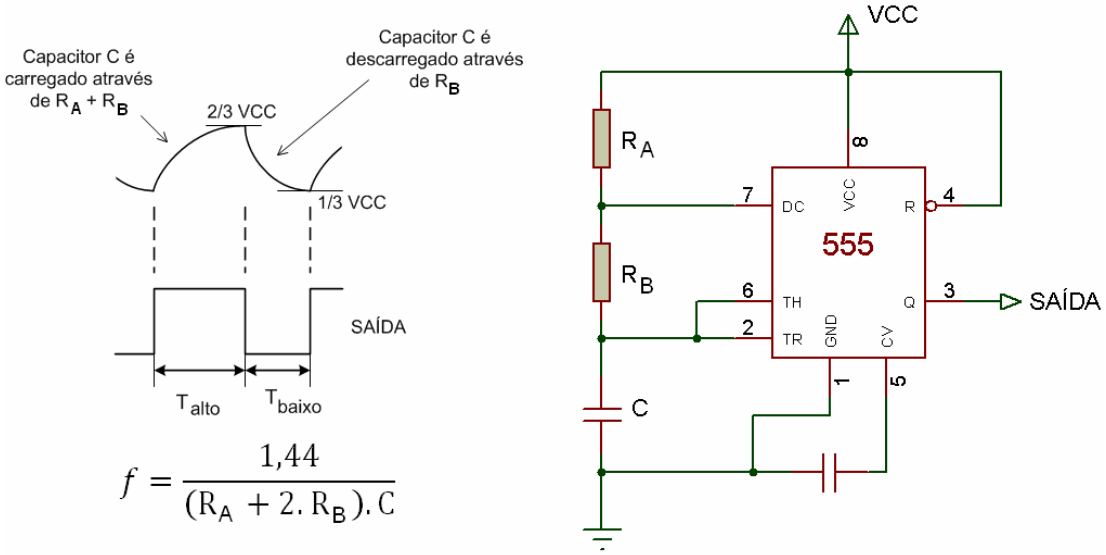


FIGURA 6 – 555 no modo astável.

O capacitor C carrega-se, tendendo ao valor de VCC, através dos resistores externos R_A e R_B. A tensão do capacitor aumenta até ultrapassar 2/3 VCC. Essa tensão é o limiar do pino 6, que leva o seu comparador a disparar o *reset* do *Flip-Flop*, colocando a saída do pino 3 em nível lógico baixo. Além disso, o transistor de descarga é ligado, fazendo com que o capacitor seja descarregado através de R_B pelo pino 7. A tensão do capacitor diminui até cair abaixo do valor de disparo (1/3 VCC). O *Flip-Flop* é acionado, então a saída retorna ao nível lógico alto e o transistor de descarga é desligado. O capacitor pode, então, ser novamente carregado e o processo é repetido. A tensão do capacitor ficará entre 1/3 VCC e 2/3 VCC.

Os cálculos dos intervalos de tempo nos quais a saída é alta e baixa podem ser feitos utilizando as seguintes relações:

$$T_{alto} \cong 0,7 \cdot C \cdot (R_A + R_B) \qquad [1]$$

$$T_{baixo} \cong 0,7 \cdot C \cdot R_B \qquad [2]$$

$$T = T_{alto} + T_{baixo} \qquad [3]$$

Sabendo-se que a frequência é o inverso do período (T), o inverso da soma das Equações 1 e 2 resulta na equação:

$$f \cong \frac{1,44}{(R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C} \qquad [4]$$

2.2.1. Dedução das equações

Para se obter as Equações 1 e 2 é necessário saber o tempo de carga e descarga de um capacitor em um circuito RC, como o da Figura 7.

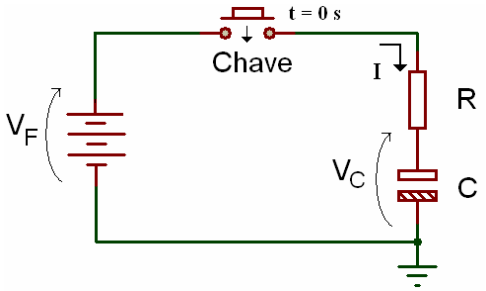


FIGURA 7 – Circuito para a carga de um capacitor.

Considerando o capacitor inicialmente descarregado e a chave aberta, quando a chave é pressionada (t = 0s) a tensão da fonte atinge o circuito RC e uma corrente I flui para o capacitor. Então, a tensão no capacitor será dada por:

$$V_C = V_F \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{R \cdot C}\right)}\right) \qquad [5]$$

onde V_C é a tensão do capacitor, V_F é a tensão da fonte ou tensão de final de carga, R é o valor da resistência, C o valor da capacitância e t é o tempo de carga.

Da equação acima, é interessante saber quanto tempo leva para o capacitor mudar de tensão. Assim, isolando-se t na Equação 5, resulta:

$$t = -R \cdot C \cdot \ln\left(1 - \frac{V_C}{V_F}\right) \qquad [6]$$

Se o capacitor da Figura 7 estiver carregado, sua tensão será a mesma da fonte, caso a fonte seja removida e a chave seja acionada, como no circuito da Figura 8, o capacitor irá se descarregar através do resistor R.

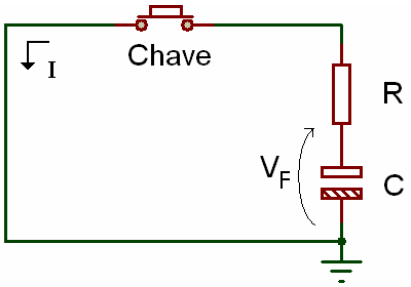


FIGURA 8 – Circuito para a descarga de um capacitor.

Agora a tensão no capacitor para a descarga será dada por:

$$V_C = V_F \cdot e^{\left(\frac{-t}{R \cdot C}\right)} \qquad [7]$$

Isolando-se t na equação acima, chega-se ao valor do tempo para que o capacitor passe de uma tensão V_F para uma tensão V_C (diminuição da tensão):

$$t = -R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_C}{V_F}\right) \qquad [8]$$

A partir das equações acima, podem ser deduzidos os tempos em que o 555 terá sua saída em nível lógico alto e baixo. Para o T_{alto}, emprega-se a Equação 6, na qual o capacitor se carrega através de R_A e R_B (Figura 6), a tensão do capacitor passará de 1/3 VCC para 2/3 VCC, o que resulta:

$$T_{alto} = -(R_A + R_B) \cdot C \cdot \ln\left(1 - \frac{\frac{1}{3} \cdot VCC}{\frac{2}{3} \cdot VCC}\right)$$

$$T_{alto} = 0{,}6931 \cdot C \cdot (R_A + R_B)$$

$$T_{alto} \cong 0{,}7 \cdot C \cdot (R_A + R_B) \qquad [9]$$

Para o T_{baixo}, emprega-se a Equação 8, na qual o capacitor se descarrega através de R_B (Figura 6), a tensão do capacitor passará de 2/3 VCC para 1/3 VCC, o que resulta:

$$T_{baixo} = -R_B \cdot C \cdot \ln\left(1 - \frac{\frac{1}{3} \cdot VCC}{\frac{2}{3} \cdot VCC}\right)$$

$$T_{baixo} = 0{,}6931 \cdot C \cdot R_B$$

$$T_{baixo} \cong 0{,}7 \cdot C \cdot R_B \qquad [10]$$

A frequência de saída do 555 será então, dada por:

$$f = \frac{1}{T_{alto} + T_{baixo}} \qquad [11]$$

$$f = \frac{1}{0{,}6931 \cdot C \cdot (R_A + R_B) + 0{,}6931 \cdot C \cdot R_B}$$

$$f = \frac{1}{0{,}6931 \cdot C \cdot (R_A + 2 \cdot R_B)}$$

$$f \cong \frac{1{,}44}{(R_A + 2 \cdot R_B) \cdot C} \qquad [12]$$

2.2.2. Exemplo de funcionamento em modo astável

O circuito da Figura 9 apresenta um circuito para piscar dois LEDs com uma determinada frequência. Quando a saída do 555 está em estado alto, o LED inferior acende e quando está em estado baixo, o superior acende, fazendo com que ambos os LEDs pisquem alternadamente.

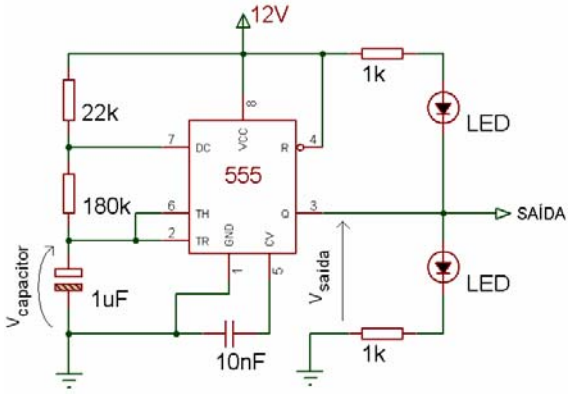


FIGURA 9 – Circuito astável para piscar dois LEDs alternadamente.

O cálculo do tempo em que a saída do 555 permanece em 12 V (tensão de alimentação) é realizado através da Equação 1, resultando em:

$$T_{alto} = 0{,}7 \cdot 1\,\mu F \cdot (22\,k\Omega + 180\,k\Omega)$$

$$T_{alto} \cong 141\,ms$$

O tempo em que a saída permanecerá em nível baixo (0 V) é calculado com a Equação 2. Assim:

$$T_{baixo} = 0{,}7 \cdot 1\,\mu F \cdot 180\,k\Omega$$

$$T_{baixo} \cong 126\,ms$$

Com os valores de T_{alto} eT_{baixo}, o período da onda de saída é calculado:

$$T_{alto} + T_{baixo} = 141 + 126$$

$$T_{alto} + T_{baixo} = 267\,ms$$

Logo, de acordo com a Equação 11, resulta numa frequência de:

$$f = \frac{1}{0{,}267}$$

$$f \cong 3{,}75\,Hz$$

As formas de onda resultante são apresentadas na Figura 10.

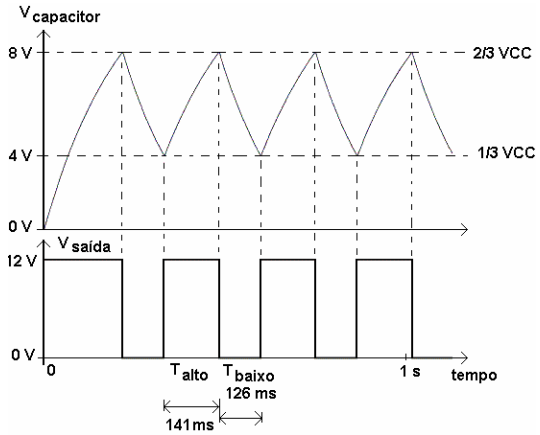


FIGURA 10 – Sinais de um circuito com o 555 em modo astável.

Observa-se que a tensão de saída muda quando a tensão no capacitor de 1 µF chega a 1/3 VCC (4 V) e 2/3 VCC (8 V) conforme o circuito comparador de entrada do 555 (Figura 4). Na energização do circuito, o capacitor está inicialmente descarregado, ao atingir 2/3 VCC ele começa a se descarregar pelo resistor de 180 kΩ até atingir 1/3 VCC quando, então, começa a se carregar pelos resistores 180 kΩ e 22 kΩ. O ciclo é ininterrupto e tem-se uma forma de onda digital na saída. Na prática, a tensão de saída do 555 será um pouco inferior à tensão de alimentação devido às quedas de tensão do circuito amplificador de saída.

2.3. Operação monoestável

A operação monoestável é a responsável pela caracterização do 555 como uma "máquina de temporização". É justamente essa operação que ativa a saída do 555 por um determinado tempo.

Quando o sinal na entrada de disparo apresentar uma borda negativa, o comparador relativo a essa entrada aciona o *Flip-Flop* do 555 e a saída deste vai a nível alto, permanecendo aí por um período de tempo dado por:

$$T_{alto} \cong 1{,}1 \cdot R_A \cdot C \qquad [12]$$

Na Figura 11 é apresentado o 555 na configuração monoestável. A borda negativa na entrada de disparo faz o comparador (1/3 VCC) disparar o *Flip-Flop*, produzindo uma tensão de saída em nível lógico alto. O capacitor C é carregado pela fonte VCC através do resistor R_A. Durante o intervalo de carga, a saída permanece alta. Quando a tensão do capacitor atinge o valor limiar de 2/3 VCC, o outro comparador dispara o *Flip-Flop* levando sua saída complementar ao nível lógico alto. Então, o transistor de descarga conduz, descarregando o capacitor. O processo pode ser repetido com um novo pulso de disparo.

Se a entrada de disparo ficar em nível lógico baixo por um período maior que T_{alto}, a saída ficará em nível lógico alto até que a entrada de disparo retorne ao nível lógico alto.

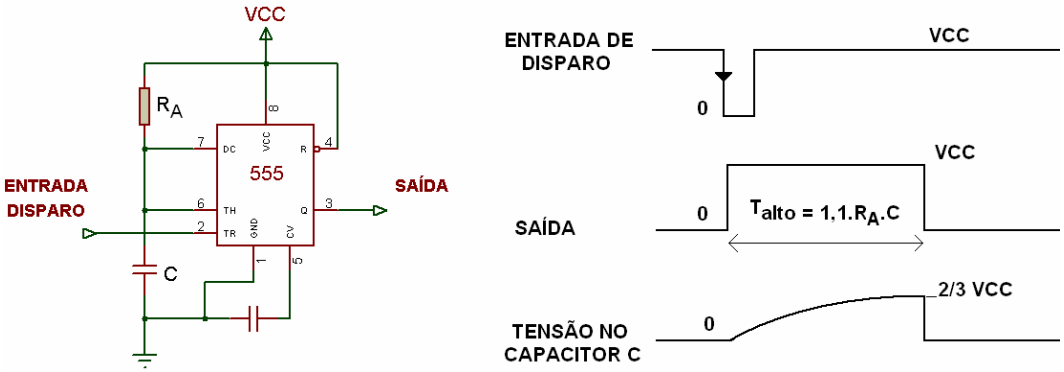


FIGURA 11 – Operação do 555 no modo monoestável.

O valor mínimo de R_A deve ser de 1 kΩ e o máximo de 1 MΩ, acima disso até 20 MΩ (limite) a precisão da temporização é comprometida. $R^T = R_A + R_B$ deve seguir este limite no caso do circuito astável (PARR, 1981).

2.3.1. Dedução da equação

Da Equação 6, chega-se ao tempo em que a saída do 555 permanece em nível lógico alto. Assim, o tempo que o capacitor leva para alcançar 2/3 VCC alimentado com uma tensão VCC é dado por:

$$T_{alto} = -R_A \cdot C \cdot \ln\left(1 - \frac{2/3 \cdot VCC}{VCC}\right)$$

$$T_{alto} = 1{,}0986 \cdot R_A \cdot C$$

$$T_{alto} \cong 1{,}1 \cdot R_A \cdot C \qquad [13]$$

2.3.2. Exemplo do 555 em modo monoestável

A Figura 12 apresenta um circuito que irá acionar um determinado motor de corrente contínua (DC) por um período de tempo de aproximadamente 10s quando um botão for pressionado.

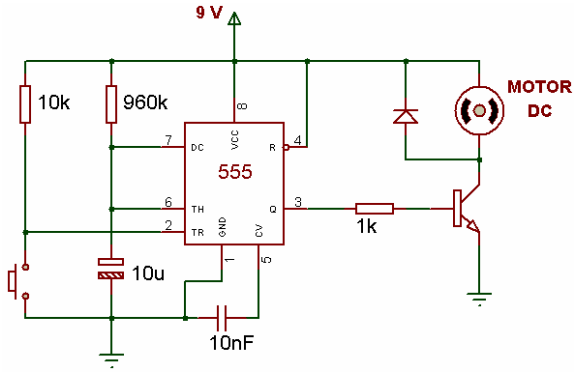


FIGURA 12 – Operação do 555 no modo monoestável para acionamento de um motor DC.

O cálculo do tempo em que o motor ficará ligado é dado pela Equação 12, resultando em:

$$T_{alto} = 1{,}1 \cdot 960\,k\Omega \cdot 10\,\mu F$$

$$T_{alto} \cong 10{,}5\,s$$

No circuito da Figura 12, quando o botão é pressionado, a entrada de disparo vai a 0 V, ocasionando o acionamento da temporização. Presume-se que o botão seja pressionado e solto em um tempo inferior ao do acionamento do motor. Na prática, o acionamento do botão é rápido. Caso o botão permaneça pressionado por um tempo maior que 10,5s, o motor ficará acionado até que o botão seja solto.

Os botões (teclas) produzem um ruído após pressionados, geralmente quando soltos, o chamado bounce, levando o sinal produzido a níveis lógicos altos e baixos em um curto espaço de tempo (em torno de 10 a 15ms). Isso pode prejudicar entradas sensíveis a transições, principalmente circuitos digitais. O 555, no modo monoestável, permite a eliminação desse tipo de ruído, o *debounce*. A saída do 555 permanecerá ativa durante o tempo de temporização, independente de pulsos adicionais na sua entrada de disparo, o segredo está em fazer com que a saída fique ativa por um tempo superior ao ruído que pode ser produzido pelo botão, produzindo um pulso "limpo".

2.4. Problemas com o uso de capacitores eletrolíticos

Segundo Parr (1981), se forem utilizados capacitores eletrolíticos, a tensão de isolação deve ser compatível com a tensão de alimentação do circuito. Um capacitor eletrolítico só se torna realmente um capacitor com o valor de capacitância nominal, quando a tensão entre seus terminais ultrapassar 1/10 da sua tensão de isolamento. Se, por exemplo, um capacitor com isolamento de 100 V for utilizado com uma fonte de 15 V, no circuito de um 555, pode-se observar as formas de onda semelhantes às da Figura 13, que têm um período muito menor que o fornecido pelos cálculos.

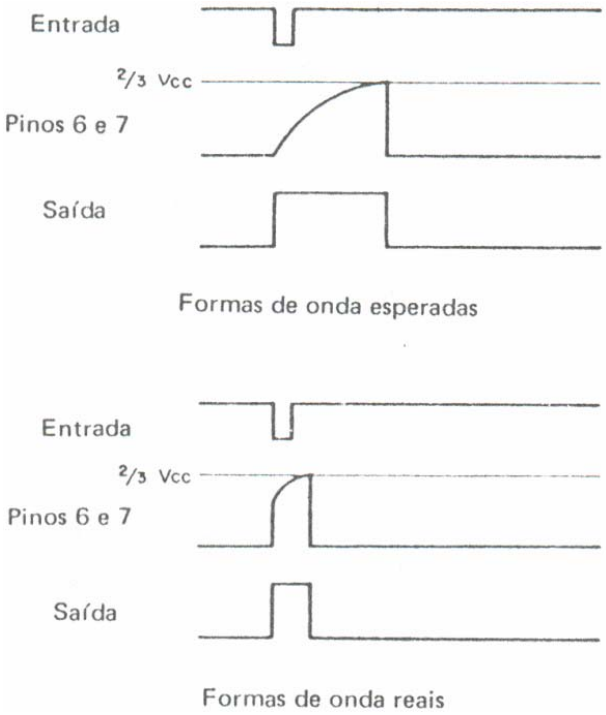


FIGURA 13 – Problemas que podem surgir com o uso de capacitores eletrolíticos no 555.

Fonte: PARR, 1981.

3. CIRCUITOS ÚTEIS

A seguir, serão apresentados vários circuitos exemplos de aplicações com o 555, com uma breve explanação sobre os seus funcionamentos. Os valores dos componentes, quando houverem, podem ser alterados para a mudança das respostas dos circuitos.

Um importante e simples circuito utilizado para a inversão lógica de sinais é apresentado na Figura 14. Quando os transistores não estão em condução, o nível lógico presente nos resistores ligados ao coletor se reflete na saída. Quando os transistores são ligados (trabalhando saturados) fazem com que as tensões de coletor e emissor sejam equalizadas e o nível lógico nesses resistores se altera (BOYLESTAD, 2005).

Esses circuitos de inversão podem ser necessários para a inversão de sinais para emprego com o 555 ou outro circuito integrado, por exemplo.

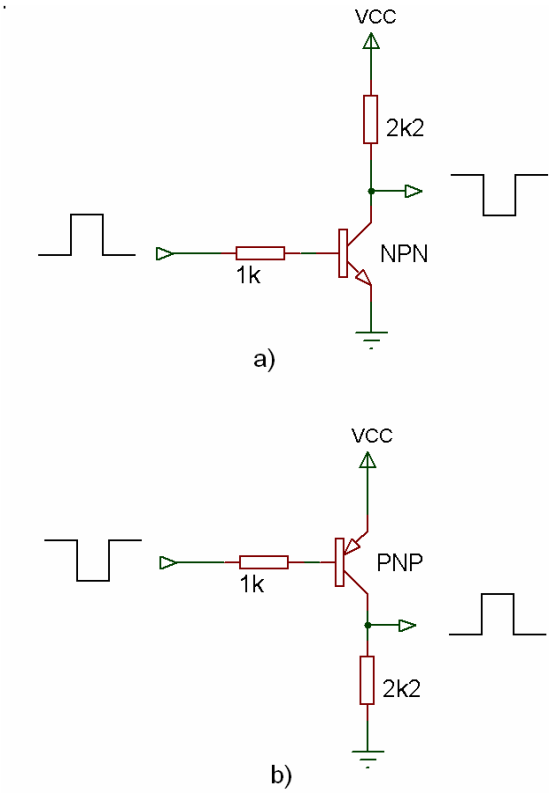


FIGURA 14 – Circuitos para inversão lógica de sinal (a) de 1 para 0 e (b) de 0 para 1.

Muitas vezes, deseja-se inicializar o 555 através do uso de um botão. O circuito da Figura 15 é empregado para essa finalidade. O circuito também serve para inicializar o 555 na energização, pois o capacitor estará descarregado. Após a carga do capacitor, o circuito terá a tensão de VCC no pino de *reset*. As formas de onda resultantes da inicialização para os modos monoestável e astável encontram-se, respectivamente, nas Figuras 15(a) e 15(b).

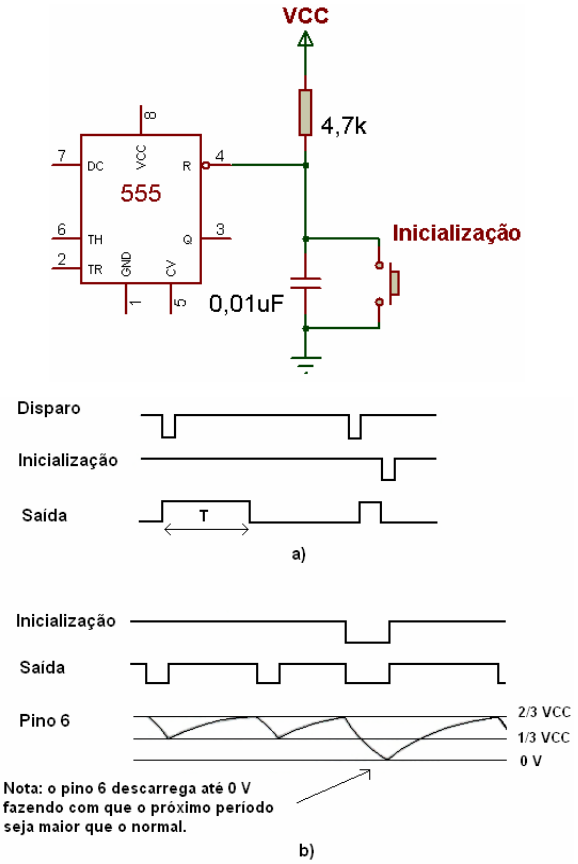


FIGURA 15 – Circuitos para inicialização (a) monoestável e (b) astável.

Para o re-disparo do 555 durante uma temporização, pode ser empregado o circuito da Figura 16. Cada vez que um re-disparo é feito, um novo ciclo de temporização é iniciado (conforme gráfico da Figura 16). Esse circuito é adequado para a supressão de ruído produzido ao se pressionar um botão, por exemplo.

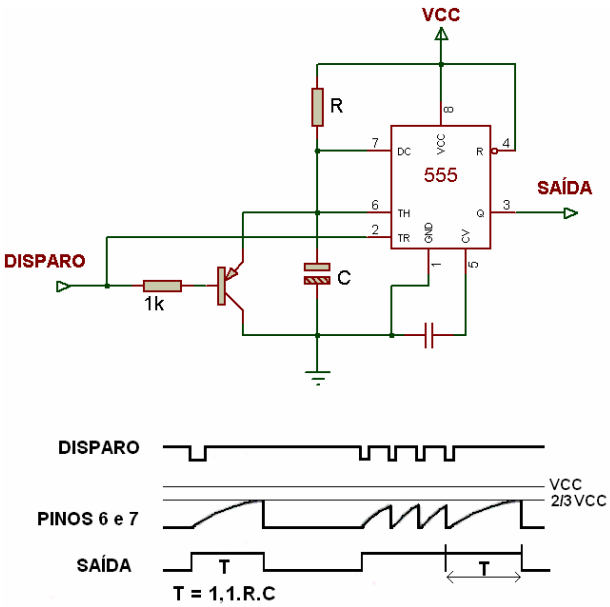


FIGURA 16 – 555 com re-disparo.

Quando houver a necessidade do controle, a distância do período de um circuito monoestável, pode ser utilizado o circuito da Figura 17. Nele, um cabo de 3 vias é empregado para conectar o potenciômetro de controle no pino 5 do 555.

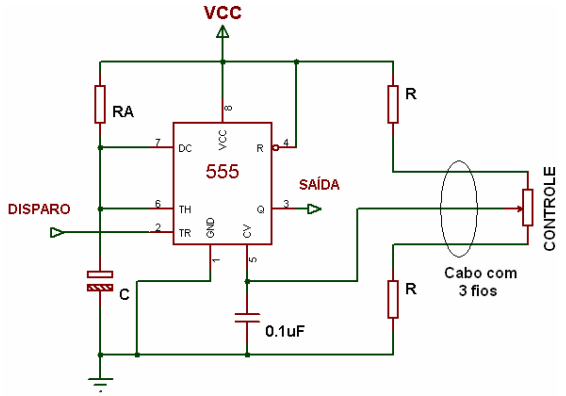


FIGURA 17 – Pino 5 usado para ajuste a distância do período do modo monoestável.

Na seção 2.2. as Equações 1 a 4 mostram que não é possível criar no 555 uma frequência digital com ciclos ativo e de repouso iguais. Para isso, é necessário o emprego do circuito da Figura 18, onde existe uma realimentação da saída (pino 3) para o pino 2, garantindo a simetria entre os ciclos ativo e de repouso da forma de onda gerada.

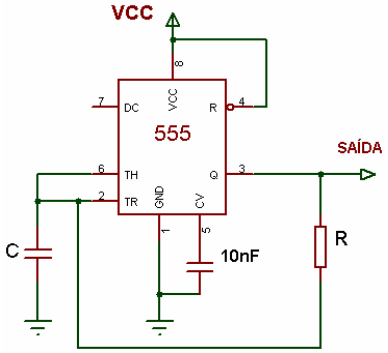


FIGURA 18 – Modo astável com período ativo e de repouso com durações iguais.

É possível detectar a luminosidade ambiente controlando o pino de *reset* do 555; a Figura 19 ilustra um circuito com essa funcionalidade. Quando ativo, o 555 gerará um sinal sonoro no alto-falante.

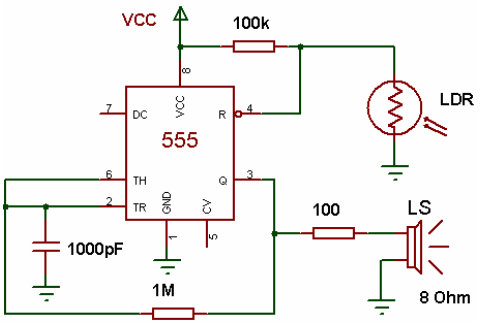


FIGURA 19 – Detector sonoro de luminosidade.

Na Figura 20 é apresentado um circuito para eliminar oscilações espúrias de um determinado sinal. O circuito emprega o conceito de histerese para produzir um circuito chamado **Schmitt Trigger** (TOCCI, 2008; PERTENCE JR, 2003).

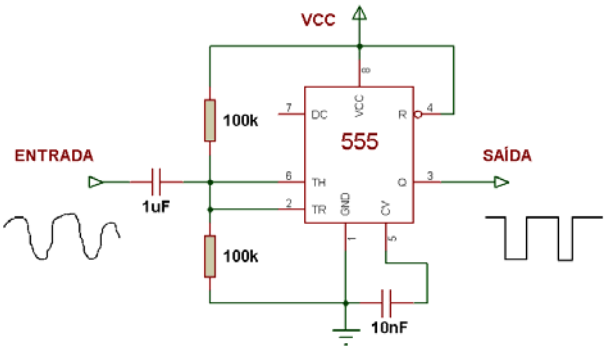


FIGURA 20 – Schmitt Trigger.

Quando se deseja um período longo de temporização, pode ser empregado o circuito da Figura 21, que permite um período de temporização de até 10 minutos.

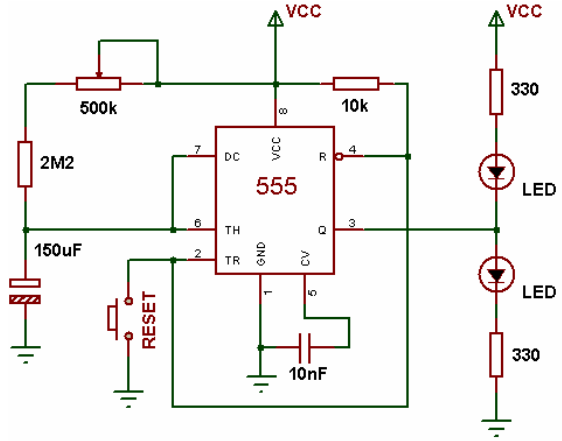


FIGURA 21 – Temporizador de até 10 minutos.

Para a medição de continuidade, pode ser empregado o circuito da Figura 22, que aciona um alto-falante quando houver um curto entre os terminais de medição. O 555 trabalhará no modo astável quando os terminais + e – forem curto-circuitados.

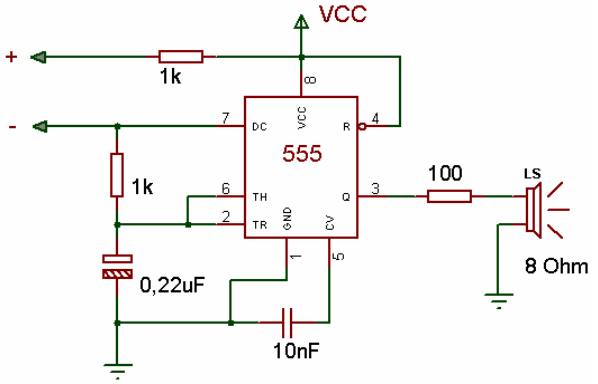


FIGURA 22 – Provador sonoro de continuidade.

Para o controle da velocidade de um motor de corrente contínua, pode ser utilizado um sinal PWM (*Pulse Wave Modulation*), conforme Figura 23. A velocidade do motor é controlada com o potenciômetro de 100 kΩ, que altera o ciclo ativo da forma de onda gerada.

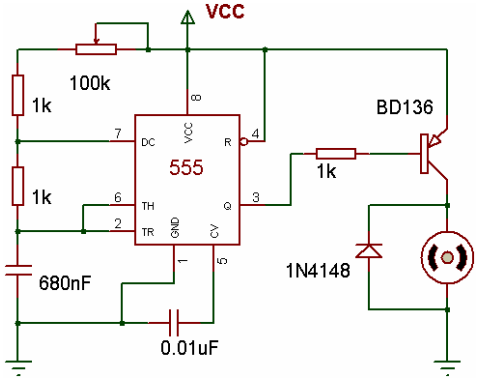


FIGURA 23 – Controle de velocidade de um motor DC.

O circuito da Figura 24 pode ser utilizado para o acionamento de uma determinada carga quando os terminais do sensor forem tocados (à mão).

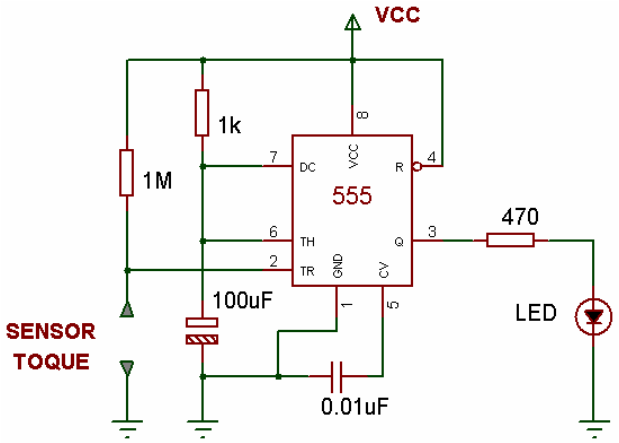


FIGURA 24 – Sensor de toque.

O 555 pode ser empregado para gerar uma "muito alta tensão" (MAT), como a utilizada em cercas eletrificadas, por exemplo. O circuito da Figura 25 ilustra um circuito para essa função (é necessário o uso de um transformador adequado para gerar a MAT).

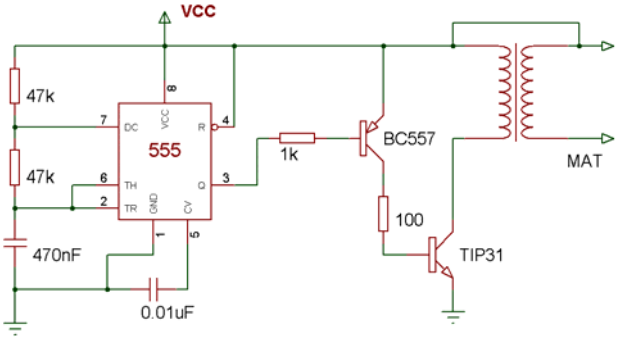


FIGURA 25 – Gerador de Muito Alta Tensão.

Uma aplicação interessante do 555 é como chave liga-desliga para o acionamento de uma determinada carga. O circuito da Figura 26 ilustra um circuito para ligar e desligar um relé quando um botão é pressionado.

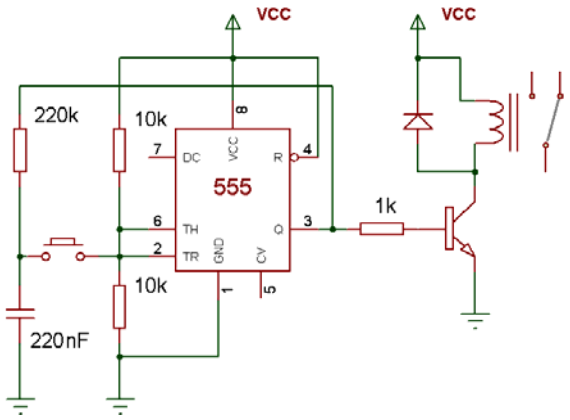


FIGURA 26 – Chave liga-desliga para acionamento de um relé.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As aplicações do CI 555 estão focadas na geração de formas de onda e temporizações. Dadas as suas características, ele é fácil de utilizar e indicado em inúmeros projetos.

Com os avanços tecnológicos, os modernos CIs fazem do 555 adequado às novas tensões e correntes. Devido aos encapsulamentos SMDs, é possível a criação de placas de circuito impresso pequenas e com a miniaturização exigida atualmente.

O conhecimento do 555 é imprescindível para o projeto e a resolução de problemas cotidianos em eletrônica. Dessa forma, é fundamental aos estudantes e projetistas de circuitos eletrônicos o domínio de sua tecnologia.

REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. *Dispositivos eletrônicos e teoria dos circuitos*. Prentice Hall do Brasil, 8ª ed, 2005.

PARR, E. A. *Projetos eletrônicos com o CI 555*. Seleções Eletrônicas, Editora Antenna, 1981.

PERTENCE JR, A. *Eletrônica analógica* – amplificadores operacionais e filtros ativos. Bookman Companhia Ed, 6ª ed., 2003.

ST MICROELECTRONICS Disponível em <http://www.st.com>. Acesso em jan. 2010.

TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. *Sistemas digitais* – princípios e aplicações. Prentice Hall do Brasil, 10ª ed., 2008.

YOREPARO Disponível em <http://www.yoreparo.com>. Acesso em jan. 2010.